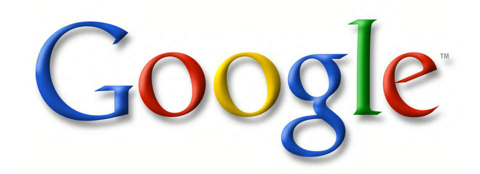
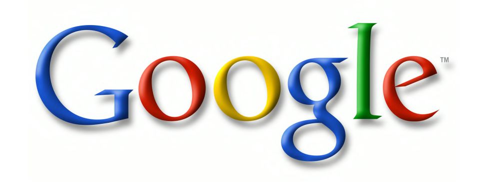
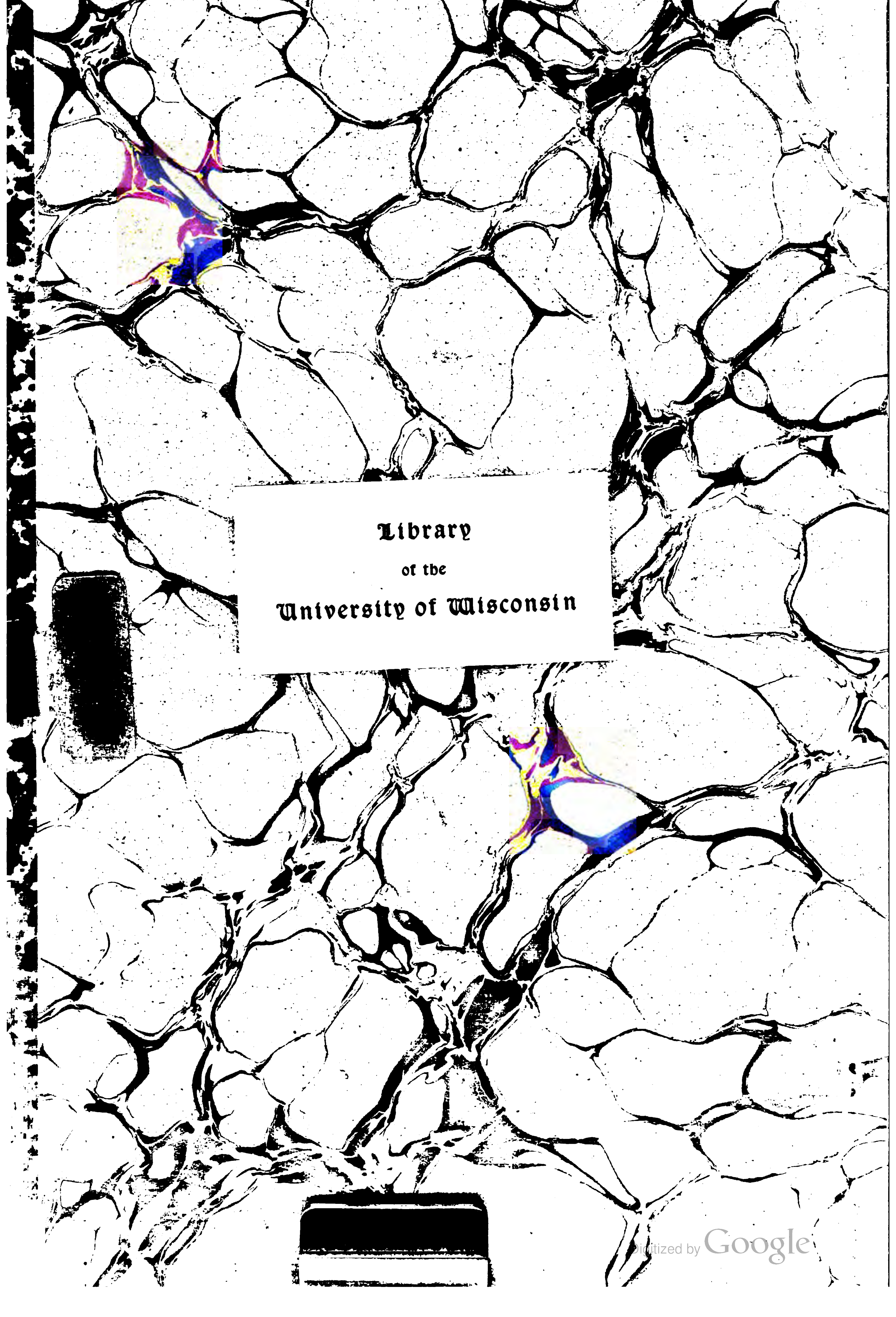








Library
of the
University of Wisconsin



COURS D'ÉLECTRICITÉ



COURS D'ÉLECTRICITÉ

THÉORIQUE ET PRATIQUE

PAR

C. SARAZIN

AGRÉGÉ DES SCIENCES PHYSIQUES, DOCTEUR EN MÉDECINE

PROFESSEUR A L'ÉCOLE NATIONALE D'ARTS ET MÉTIERS D'ANGERS

PROFESSEUR DE PHYSIQUE A L'ÉCOLE DE MÉDECINE ET DE PHARMACIE

DEUXIÈME ÉDITION REVUE ET AUGMENTÉE



PARIS

E. BERNARD & Cie, IMPRIMEURS-ÉDITEURS

29, Quai des Grands-Augustins, 29

1903

Préface de la 1re édition

Ce cours est la reproduction de leçons faites à des élèves destinés à l'industrie et ne pouvant consacrer qu'un temps limité aux études théoriques.

On s'est proposé d'examiner aussi rapidement que possible les phénomènes et les appareils électriques de façon à permettre au lecteur d'aborder sans difficulté la pratique même de l'Electricité. Dans ce but, les parties purement théoriques ont été réduites au minimum d'étendue, et l'on a, au contraire, développé les chapitres présentant un intérêt pratique. Signalons en particulier, parmi ces derniers, l'étude du courant, l'électro-magnétisme et l'induction, matières constituant les préliminaires des applications de l'Electricité. Un assez grand nombre de tableaux et des exemples numériques ont été insérés dans le texte pour faciliter l'emploi des lois établies.

Parmi les applications du courant, on a cherché à donner sur les dynamos, sur l'éclairage et sur le transport d'énergie, des idées assez complètes mais générales sans vouloir examiner en détail tous les appareils qui peuvent se présenter.

Une étude embrassant tous les cas particuliers deviendrait d'ailleurs rapidement incomplète dans la situation actuelle de l'industrie électrique tandis que la connaissance des faits généraux permet au lecteur d'examiner et de comprendre avec la plus grande facilité le fonctionnement des organes nouveaux d'après une description sommaire.



Préface de la 2e édition

Le plan général de ce cours, professé à l'École Nationale d'Arts et Métiers d'Angers, n'a pas subi de modification notable, et seul le développement a été changé dans certaines parties.

Le problème qui se posait dans la rédaction de ces leçons était le suivant : Étant donnés des élèves possédant des connaissances mathématiques peu étendues (élémentaires plus quelques compléments de calcul infinitésimal) et un nombre d'heures déterminé, fournir à ces auditeurs ou à ces lecteurs les matériaux les plus utiles dans l'application de l'Électricité à l'Industrie.

Deux solutions se présentaient :

1° Développer des idées générales, aussi complètes que le permettent le temps consacré et les connaissances mathématiques, sur les genres de machines et d'appareils que l'étudiant aura plus tard à employer, en négligeant forcément les détails relatifs à chaque type particulier.

2° Choisir quelques-uns des types et les étudier en détail sans pouvoir, dans ce cas, songer à l'examen général embrassant tous les genres.

Parmi ces deux méthodes, on a choisi sans hésitation la première pour la raison que voici :

Imaginons le lecteur en possession de données générales solides sur le genre de machines qu'il doit employer ; si un type particulier se présente, il lui suffira de la lecture d'une notice ou d'un examen personnel rapide pour compléter ses connaissances.

Au contraire soit un électricien connaissant quelques types dans tous leurs détails mais dépourvu d'idées d'ensemble ; les espèces sont nombreuses en Électricité, comme on le sait, et si la machine qui se présente n'est pas de celles qui ont été examinées, il faudra un travail considérable pour l'étude particulière en question ; cette dépense d'énergie intellectuelle sera d'ailleurs à répéter pour chaque nouvelle application.

De plus en plus convaincu des avantages que présente la méthode adoptée, on s'est attaché, dans cette seconde édition, à une application plus stricte du procédé ; le lecteur pourra s'en rendre compte surtout dans l'étude des machines productrices de l'Électricité et dans celle des moteurs ; ces parties ont reçu des développements nouveaux importants et les divers types indiqués ou représentés ont été pris seulement à titre d'exemples et choisis parmi ceux que l'on trouve le plus souvent dans l'Industrie. En raison de l'importance considérable acquise en ces dernières années par les courants alternatifs, on a donné à l'étude des alternateurs une importance égale à celle des dynamos en examinant d'une manière plus étendue que précédemment les propriétés spéciales de ces courants alternatifs ; leurs divers transformateurs font également l'objet d'études nouvelles.

Signalons encore les applications thermiques de l'électricité qui ont été examinées séparément, dans cette édition, sous le nom d'Électrothermie.

Enfin, on insistera sur le chapitre des Mesures ; *il a demandé des additions nombreuses dictées par la nécessité d'initier le lecteur, dans le moins de temps possible, à la pratique des déterminations faites couramment dans les laboratoires. Le lecteur y trouvera donc la description des appareils, le principe des méthodes à employer et la façon pratique d'opérer avec tous les détails indispensables. Cette étude est facilitée par des schémas nombreux intercalés dans le texte. L'expérience a montré que les élèves munis de ces renseignements sont capables d'exécuter convenablement les déterminations électriques qui se présentent ordinairement.*

INTRODUCTION

Nous aurons constamment à effectuer des mesures ; il est donc utile, avant de commencer l'étude de l'Electricité, de rappeler quelques notions relatives à ces mesures.

Définitions. — *Mesurer une grandeur,* c'est chercher combien de fois une grandeur de même nature est contenue dans la première.

Ainsi, par exemple, pour mesurer une longueur, on prend une règle, c'est-à-dire une autre longueur et on la porte bout à bout autant de fois qu'il est nécessaire pour recouvrir la longueur étudiée.

Cette règle, de dimension déterminée, et de même toutes ces grandeurs, termes de comparaison, s'appellent *unités.*

Il y a évidemment autant d'unités qu'il existe d'espèces de grandeurs.

Toutes ces unités peuvent être choisies d'une façon quelconque, suivant les convenances, pour chaque grandeur spéciale ; ces unités laissées toutes indépendantes les unes des autres prennent le nom *d'unités arbitraires.*

Mais on peut aussi les relier entre elles, ce qui simplifie les calculs numériques, comme nous allons le voir; on forme ainsi un système *d'unités coordonnées.*

Avantage d'un système d'unités coordonnées. — Pour montrer la simplification des calculs, choisissons un seul cas très usuel, tiré de la géométrie.

On démontre que la surface d'un rectangle est *proportionnelle* au produit de ses deux dimensions, ce qui s'écrit :

$$S = K . a . b. \tag{1}$$

si on appelle a et b les deux côtés et K une constante. Deux multiplications sont donc nécessaires pour obtenir la valeur de la surface.

La formule et le calcul se simplifient si nous convenons de prendre pour unité de surface, non une surface arbitraire, comme nous en avons le droit, mais celle d'un carré construit sur l'unité de longueur. En effet, alors le simple produit de a par b donne la surface S, car en particulier pour $a = b = 1$, carré ayant pour côté l'unité, on a $S = 1$, unité de surface. Donc le coefficient K est rendu égal à 1 et l'on a simplement :

$$S = a . b. \tag{2}$$

Une seule multiplication suffit et, dans ce cas où l'on fait usage d'unités coordonnées, la surface d'un rectangle *égale* le produit de ses deux dimensions.

Tous les autres exemples que l'on pourrait choisir montreraient de même l'avantage du système d'unités coordonnées sur un ensemble d'unités arbitraires.

Unités fondamentales et dérivées. —L'exemple précédent a fait intervenir deux unités, une pour la longueur, l'autre pour la surface. Nous n'avons pas parlé de toucher à la première qui est dite *fondamentale* ; elle ne dépend, en effet, d'aucune autre unité. On l'a choisie, suivant des considérations spéciales, et arbitrairement.

L'unité de surface, au contraire, a été tirée de cette unité fondamentale ; c'est une *unité dérivée.*

L'unité de longueur n'est pas la seule fondamentale; nous aurons occasion d'en reparler et de dire qu'elle est accompagnée de deux autres unités de la même catégorie. De ces trois se déduisent des unités dérivées en nombre indéfini.

Dimensions des unités dérivées. — Les unités dérivées changent évidemment si on modifie les unités fondamentales. On appelle *dimension* de chaque unité dérivée la relation qui existe entre elle et les unités fondamentales. Pour écrire cette relation sous la forme algébrique, on représente chaque unité par une lettre, initiale du nom de la grandeur, autant que possible, mise entre crochets. Ainsi [L] symbolise l'unité de longueur, [S] celle de surface, etc.

D'après cela nous aurons :

$$[S] = [L]^2 = [L^2]$$

ce qui veut dire que l'unité dérivée de surface est la surface du carré construit sur l'unité fondamentale de longueur. De même pour l'unité de volume :

$$[V] = [L]^3 = [L^3]$$

Expression numérique d'une quantité. — *Le nombre qui exprime la grandeur est en raison inverse de la valeur de l'unité adoptée.* Supposons une mesure faite avec l'unité [N]. On trouve ce terme de comparaison contenu n fois dans la grandeur qui vaut donc

$$(1) \qquad n\,[N] :$$

et qui s'exprime par le nombre n.

On recommence ensuite l'opération avec une autre unité [N']; on la trouve contenue n' fois. Donc la grandeur, toujours la même, vaut encore

$$(2) \qquad n'\,[N'] :$$

et s'exprime alors par le nouveau nombre n'. Nous pouvons égaler les deux expressions (1) et (2) d'une même grandeur :

$$n\,[N] = n'\,[N']$$

D'où nous déduisons :

$$(3) \qquad \frac{n'}{n} = \frac{[N]}{[N']}$$

ce qui est bien la proposition énoncée.

Si la grandeur évaluée de deux manières différentes est une longueur par exemple, il est facile de passer d'une valeur numérique à l'autre par l'équation (3). Mais il n'est pas aussi simple de transformer la mesure si l'on a affaire à une unité dérivée et si l'on change l'unité fondamentale. C'est alors qu'interviennent les équations de dimensions : soit un volume, il s'exprime



par le nombre v correspondant à l'unité [V], liée elle-même à la longueur unité [L]. Nous pouvons modifier cette unité fondamentale, la changer en [L']; l'unité de volume s'en ressent et devient [V']; la mesure du volume est alors v', telle que [équation (3).]

$$\frac{v'}{v} = \frac{[V]}{[V']}$$

Or :

$$[V] = [L]^3$$

et

$$[V'] = [L']^3$$

donc :

$$\frac{v'}{v} = \frac{[L]^3}{[L']^3} = \left\{\frac{[L]}{[L']}\right\}^3$$

En particulier supposons que [L] soit le mètre et [L'] le centimètre ; le rapport entre accolades est 100; son cube vaut 1.000.000 de sorte que la nouvelle valeur numérique de la capacité vaut un million de fois l'ancienne valeur.

Système C. G. S. — Toutes les grandeurs mécaniques s'expriment au moyen des trois unités fondamentales de longueur, de masse et de temps. Ces trois grandeurs sont en effet irréductibles; on doit donc leur choisir à chacune une unité et cela d'une façon arbitraire. Ce choix doit cependant être guidé par un certain nombre de considérations. Quand il est fait, toutes les unités dérivées qui en découlent forment avec les trois fondamentales le *système absolu.* Un premier choix a été fait par Gauss; il n'a pas prévalu. Les unités adoptées de nos jours ont été proposées par l'Association britannique en 1860 et consacrées ensuite par le Congrès international des électriciens réuni à Paris, en 1881. Les voici :

1° Unité de longueur : le centimètre, centième partie d'une règle conservée aux archives sous le nom de mètre et valant *sensiblement* $\frac{1}{40.000.000}$ du méridien terrestre;

2° Unité de masse. — On a pris pour unité fondamentale celle de masse et non celle de poids pour cette raison que le *poids* d'un corps dépend de la latitude à laquelle on opère. La *masse*, au contraire, est absolument fixe. Son unité est la *masse du gramme*, c'est-à-dire celle d'un centimètre cube d'eau distillée prise à la température de 4° centigrades. Avec ce choix particulier, la masse et le poids en grammes s'expriment par le même nombre ;

3° L'unité de temps est la seconde sexagésimale du temps solaire moyen.

Ces trois unités fondamentales : centimètre, gramme, seconde, portent le nom *d'unités C. G. S.*; avec toutes les unités dérivées qu'on en déduit, elles forment le *système absolu C. G. S.* On a entre autres unités dérivées :

Surface, le centimètre carré;
Volume, le centimètre cube ;
Vitesse, la vitesse d'un mobile qui parcourt un centimètre par seconde;
Accélération, l'accélération d'un mobile dont la vitesse par seconde augmente d'un centimètre par seconde.

En particulier, on sait qu'un mobile, abandonné à lui-même dans l'espace,

prend un mouvement uniformément accéléré dans lequel la vitesse par seconde croît chaque seconde de $9^m,81$ à Paris. Nous exprimerons cette accélération, dans le système C. G. S. par le nombre 981.

Force. — Voici comment nous fixerons l'unité : une force constante F communique à un corps un mouvement uniformément accéléré et la valeur de cette force est le produit de la masse m du mobile par l'accélération communiquée a :

$$F = ma ;$$

la force vaut donc 1 quand la masse et l'accélération sont toutes deux l'unité. Ainsi l'unité de force est la force qui donne à la masse du gramme une accélération d'un centimètre par seconde. On donne à cette unité le nom de *dyne.*

En particulier, la force pesanteur qui s'exerce sur le gramme donne l'accélération 981, donc elle a pour valeur 981 dynes (à Paris).

1 gramme-poids à Paris vaut. . . . . . 981 dynes
1 milligramme-poids . . . . 0,981 dyne

Travail ou énergie. — L'unité est le travail qui se produit quand on déplace d'un centimètre le point d'application de la dyne. Elle s'appelle *erg.* Sa valeur est petite et on est souvent amené à exprimer les travaux, dans la pratique, par des nombres considérables. On substitue alors à l'*erg* une unité plus forte le *mégerg :*

$$1 \text{ mégerg} = 1.000.000 \text{ ergs.}$$

Nous allons relier le kilogrammètre à ces unités C. G. S. Le kilogrammètre est le travail nécessaire au déplacement égal à 1 mètre d'une force de 1 kilogramme.

Or, 1 kilogramme vaut. à Paris. . . . 981.000 dynes
1 mètre égale . . . . 100 centimètres.

Donc

1 kilogrammètre équivaut à Paris à : 981.000×100

soit à :

$$98.100.000 \text{ ergs} = 9,81 \times 10^7 \text{ ergs}$$
$$= 98,1 \text{ mégergs.}$$

Puissance. — C'est l'énergie produite en une seconde.

L'unité C. G. S. est donc la puissance qui correspond à un travail d'un erg par seconde.

Dans la pratique industrielle, l'unité de puissance adoptée en France est le *cheval-vapeur* qui représente 75 kilogrammètres produits en une seconde :

1 cheval-vapeur vaut à Paris : $9,81 \times 75 \times 10^7$ ergs par seconde.
ou : 736×10^7 ergs —
7360 mégergs —

L'unité anglaise *horse-power* vaut un peu plus.

On emploie aussi une unité internationale de puissance, sous le nom de *Poncelet :*

1 poncelet = 100 kilogrammètres par seconde.
$= 9,81 \times 10^9$ ergs par seconde à Paris.
= 9.810 mégergs.

Deux sortes de mesures. — Il y a, d'une manière générale, deux façons d'effectuer les mesures :

1° On compare directement la grandeur à l'unité. Ainsi, par exemple, s'il s'agit d'évaluer une surface, on prend la surface unité et on la juxtapose à elle-même un nombre suffisant de fois pour recouvrir la superficie étudiée. La mesure ainsi faite est dite *directe* ou encore *relative* et, en effet, elle possède bien ces deux qualités.

2° On ne fait pas usage de l'unité spéciale relative à la grandeur étudiée, mais on emploie des étalons d'espèces différentes et on fait usage des relations qui existent entre les deux ordres de grandeurs. Prenons pour exemple la mesure d'une surface, celle d'un rectangle. Au lieu d'employer l'unité de surface, nous évaluons, en nous servant d'un étalon de longueur, la base et la hauteur du rectangle, puis nous appliquons la formule :

$$\text{Surface} = \text{base} \times \text{hauteur}.$$

Cette mesure est *indirecte ;* de plus elle est *absolue*, c'est-à-dire indépendante de l'unité spéciale à la grandeur étudiée.

Erreurs dans les mesures. — En pratique, aucune détermination n'est parfaite ; toutes sont forcément entachées d'une erreur plus ou moins importante.

On distingue d'ailleurs deux sortes d'erreurs : les unes sont dites *systématiques* et tiennent à :

1° Un vice de la méthode employée ;
2° Un défaut de l'appareil ;
3° L'observateur lui-même.

Pour éliminer ces erreurs, il faut faire de nouvelles déterminations en changeant, si cela est possible :

1° de méthode ;
2° d'appareil ;
3° d'opérateur.

et faire la moyenne des résultats obtenus.

Les secondes sortes d'erreurs sont appelées *accidentelles* ; elles varient d'importance d'une expérience à une autre et tiennent à ce que toutes les déterminations ne sont pas faites avec un égal soin. On les élimine en répétant les expériences un certain nombre de fois et en prenant la moyenne de tous les nombres trouvés.

Mesures directes ou relatives. — On opère généralement de trois manières différentes :

1° *par comparaison immédiate* comme on le fait dans l'évaluation d'une longueur au moyen d'une longueur étalon ;

2° *par comparaisons successives* comme cela a lieu dans une balance romaine : on évalue le rapport de deux bras de levier et on sait que ce rapport est égal à celui des deux poids qui nécessitent les positions correspondantes du curseur pour amener l'horizontalité du fléau ;

3° *par réduction à zéro.* — Cette manière de faire trouve son emploi dans la pesée par la balance ; on annule, en effet, le déplacement du fléau en mettant dans les deux plateaux des poids égaux, d'un côté le corps étudié, de l'autre des poids marqués.

Il faut toujours se rendre compte des erreurs commises. Nous ne dirons rien des erreurs systématiques et nous ne considérerons que les erreurs

accidentelles. Soit, pour fixer nos idées, une mesure de longueur. Nous la répétons dix fois et nous trouvons comme résultats de ces opérations :

Première mesure	. . . .	$1^m,001$
Deuxième —	. . . .	$1^m,000$
Troisième —	. . . .	$0^m,999$
Quatrième —	. . . .	$0^m,998$
Cinquième —	. . . .	$1^m,002$
Sixième —	. . . .	$1^m,001$
Septième —	. . . .	$1^m,001$
Huitième —	. . . .	$0^m,999$
Neuvième —	. . . .	$1^m,002$
Dixième —	. . . .	$0^m,998$
	Total . . .	$10^m,001$

d'où la *valeur moyenne* :

$$\frac{10,001}{10} = 1^m,0001$$

Si nous reprenons chacun des chiffres précédents, nous voyons qu'ils diffèrent tous plus ou moins de la valeur moyenne. Ces *différences* sont respectivement :

Pour la	première	mesure	1.001,	différence avec	la moyenne	= + 0.001
—	2e	—	1.000	—	—	0.000
—	3e	—	0.999	—	—	— 0.001
—	4e	—	0.998	—	—	— 0.002
—	5e	—	1.002	—	—	+ 0.002
—	6e		1.001	—	—	+ 0.001
—	7e		1.001	—	—	+ 0.001
—	8e	—	0.999	—	—	— 0.001
—	9e	—	1.002	—	—	+ 0.002
—	10e	—	0.998	—	—	— 0.002

Prenons toutes ces différences en valeur absolue et calculons la moyenne arithmétique ; nous trouvons :

$$\frac{0,013}{10} = 0,0013$$

ce chiffre constitue l'*erreur moyenne* commise. La connaissance de cette erreur nous enseigne qu'il ne faut compter, dans cette mesure, que sur le millimètre. Les décimales d'un ordre plus élevé sont donc illusoires et on peut ne pas les conserver. Mais il est ordinairement plus utile de considérer l'*erreur relative moyenne*. On nomme ainsi le rapport de l'erreur moyenne au résultat moyen et l'on a, dans l'exemple précédent :

$$\text{Erreur relative moyenne} = \frac{\text{erreur moyenne}}{\text{résultat moyen}} = \frac{0,0013}{1,0001} = 1,3\,^0/_{00}.$$

Mesures indirectes ou absolues. — Nous ferons d'abord remarquer qu'aux trois sortes d'erreurs systématiques déjà indiquées, c'est-à-dire provenant de la méthode, des appareils et de l'opérateur, il faut joindre une quatrième cause d'erreur due à la formule qui relie la grandeur calculée aux grandeurs évaluées. Cette nouvelle cause d'erreur interviendrait dans la mesure d'une surface au moyen de ses dimensions linéaires si la formule



de la surface nous était imparfaitement connue. Le changement de méthode déjà indiqué obligerait à changer de relation et par suite éliminerait cette erreur.

Bornons-nous donc à considérer les erreurs accidentelles. Celle qui est commise sur le résultat dépend évidemment de celles qui affectent chaque évaluation. Ainsi, par exemple, si nous mesurons l'aire d'un rectangle, les deux erreurs faites sur l'évaluation des deux dimensions linéaires se traduisent par une erreur sur la surface. Nous allons chercher à calculer cette erreur finale ; soit d'une manière générale une grandeur y que nous évaluons au moyen de trois autres grandeurs x_1 x_2 x_3 (Telles seraient les trois dimensions d'un parallélipipède dont nous chercherions le volume.)

On peut donc écrire que :

$$y = f(x_1, x_2, x_3)$$

Une erreur commise sur x_1 seulement entraîne une différence pour y et cette différence a sensiblement pour valeur :

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} \times \Delta x_1$$

$\frac{\partial f}{\partial x_1}$ étant la dérivée de la fonction y prise par rapport à x_1. De même une erreur commise sur x_2 soit $\Delta\ x_2$ donne à y une variation égale à :

$$\frac{\partial f}{\partial x} \times \Delta x_2$$

et celle que l'on fait sur x_3, soit $\Delta\ x_3$ produit sur y l'erreur :

$$\frac{\partial f}{\partial x_3} \times \Delta x_3$$

$\frac{\partial f}{\partial x_2}$ et $\frac{\partial f}{\partial x_3}$ étant les deux dérivées de y prises respectivement par rapport à x_2 et à x_3.

Si nos trois évaluations x_1 x_2 x_3, sont entachées d'erreurs, nous avons sur y une erreur totale Δy qui est la somme des trois erreurs partielles calculées précédemment, c'est-à-dire :

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1}\ \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2}\ \Delta x_2 + \frac{\partial f}{\partial x_3} \Delta x_3$$

et l'*erreur relative* s'exprime par :

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{1}{y}\ \frac{\partial f}{\partial x_1}.\ \Delta x_1 + \frac{1}{y}\ \frac{\partial f}{\partial x_2}.\ \Delta x_2 + \frac{1}{y}\ \frac{\partial f}{\partial x_3}.\ \Delta x_3$$

Remarquons que les diverses erreurs partielles, peuvent être dans la pratique, de signes différents et par conséquent sont capables de se compenser au moins en partie. Dans notre calcul nous ajoutons leurs valeurs absolues et nous sommes certains d'obtenir un résultat supérieur à l'erreur réellement commise.

Nous appliquerons ces données générales aux cas les plus simples qui peuvent se présenter dans la pratique. Les relations les moins compliquées sont celles qui font intervenir une seule opération arithmétique, addition, soustraction, multiplication ou division :

1° *Addition.* — Exemple : évaluation de la hauteur barométrique au

moyen d'un appareil à siphon. La pression H s'obtient en additionnant les deux longueurs partielles l et l', lues sur les deux échelles

$$H = l + l'.$$

Dans ce cas, les deux dérivées partielles sont :

$$\frac{\partial H}{\partial l} = 1$$

et

$$\frac{\partial H}{\partial l'} = 1$$

donc

$$\Delta H = \frac{\partial H}{\partial l} \times \Delta l + \frac{\partial H}{\partial l'} \times \Delta l'$$

se réduit à :

$$\Delta H = \Delta l + \Delta l'$$

C'est l'erreur moyenne absolue. Quant à l'erreur relative elle s'exprime par :

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta l + \Delta l'}{l + l'}$$

Nous allons comparer cette erreur relative commise sur la pression mesurée aux erreurs relatives qui affectent chacune des deux longueurs partielles.

Nous avons :

Erreur relative sur l : $\frac{\Delta l}{l}$

Erreur relative sur l' : $\frac{\Delta l'}{l'}$

Supposons la première supérieure à la seconde:

$$(1) \qquad \frac{\Delta l}{l} > \frac{\Delta l'}{l'}$$

Comparons dès lors:

$$\frac{\Delta H}{H} \quad \text{à} \quad \frac{\Delta l}{l}$$

et pour cela réduisons ces deux fractions au même dénominateur ; nous avons

$$(2) \qquad \frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta l + \Delta l'}{l + l'} = \frac{l \Delta l + l \Delta l'}{l(l + l')}$$

et

$$(3) \qquad \frac{\Delta l}{l} = \frac{(l + l')\Delta l}{l\,(l + l')} = \frac{l \Delta l + l' \Delta l}{l(l + l')}$$

D'après l'inégalité (1) posée ci-dessus, nous avons:

$$l' \Delta l > l \Delta l'$$

donc la fraction (3) est supérieure à (2) et nous pouvons écrire:

$$\frac{\Delta H}{H} < \frac{\Delta l}{l}$$

c'est-à-dire que l'*erreur relative totale est inférieure à la plus grande des deux erreurs relatives partielles.*

La méthode est donc avantageuse.

2° *Soustraction.* — Exemple : Soit une mesure d'élévation de température au moyen de deux lectures sur le thermomètre.

$$T = t - t'$$

Erreur absolue :

$$\Delta T = \Delta t + \Delta t'$$

puisque nous *additionnons* toujours les valeurs absolues des erreurs commises.

Erreur relative :

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta t + \Delta t'}{t - t'}.$$

On trouverait, par un raisonnement identique à celui qu'on a fait, dans le cas précédent, que cette erreur relative totale, est supérieure à la plus grande des erreurs relatives commises sur les évaluations de t et de t'. D'ailleurs on voit que $\frac{\Delta T}{T}$ est d'autant plus considérable que les deux nombres t et t' sont plus voisins. Nous avons donc là une méthode à éviter autant que possible.

3° *Multiplication.* — Exemple : mesure de la surface d'un rectangle :

$$S = b \times h.$$

On a

$$\frac{\partial S}{\partial b} = h$$

et

$$\frac{\partial S}{\partial h} = b$$

donc l'erreur totale est :

$$\Delta S = h.\Delta b + b.\Delta h$$

et l'erreur relative :

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{h.\Delta b + b.\Delta h}{b.h} = \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta h}{h}$$

$\frac{\Delta b}{b}$ et $\frac{\Delta h}{h}$ sont respectivement les erreurs relatives commises sur les mesures de la base et de la hauteur. Donc l'*erreur relative totale égale la somme des erreurs relatives commises sur les évaluations des deux longueurs.* Si ces deux mesures sont faites avec une approximation de 1 °/₀₀, la surface sera exacte à 2°/₀₀ près.

4° *Division.* — Exemple : pression exercée par un poids P de liquide agissant sur une surface S. On a pour valeur de cette pression :

$$p = \frac{P}{S}$$

Or :

$$\frac{\partial p}{\partial P} = \frac{1}{S}$$

et

$$\frac{\partial p}{\partial S} = -\frac{P}{S^2}$$

donc l'erreur totale est :

$$\Delta p = \frac{1}{S}\Delta P + \frac{P}{S^2}\Delta S$$

et l'erreur relative :

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\frac{1}{S}\Delta P + \frac{P}{S^2}\Delta S}{\frac{P}{S}} = \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta S}{S}$$

L'*erreur relative totale est encore égale,* comme dans le cas précédent, *à la somme des erreurs relatives commises sur les deux grandeurs mesurées* P et S.

PREMIÈRE PARTIE

ELECTROSTATIQUE

CHAPITRE PREMIER

PRÉLIMINAIRES

Le point de départ de tous les faits connus a été découvert par Thalès de Milet, vers l'an 600 avant Jésus-Christ : l'ambre jaune, frotté par une étoffe de laine, devient capable de soulever de petits morceaux de papier ou d'autres menus objets.

Ce phénomène est resté isolé pendant plus de 2.000 ans, puis il a été généralisé par les physiciens anglais Gilbert et Gray, après lesquels on a pu énoncer le principe suivant :

Tous les corps convenablement frottés acquièrent la propriété d'attirer les objets légers.

On appelle *électricité* la cause inconnue du phénomène, tandis que le corps frotté est qualifié d'*électrisé*.

Bons et mauvais conducteurs. — Dans l'énoncé précédent, nous devons faire une restriction relative à la manière de frotter les objets ; si en effet on opère sans précaution, on voit les uns s'électriser alors que les autres ne manifestent aucune propriété nouvelle. Mais ces derniers suivent la loi générale si on a soin de les tenir par un manche de verre bien sec, et ils attirent alors les corps légers par tous leurs points tandis que l'ambre et les autres substances de la même catégorie n'agissent que par leurs points directement frottés.

On peut donc conclure de là, sans hésitation, que :

1° Certains corps s'opposent à tout déplacement du siège de la propriété électrique; ils sont *mauvais conducteurs* ;

2° D'autres se laissent immédiatement traverser ; on les nomme *bons conducteurs* de l'électricité.

Les métaux appartiennent à la seconde classe; le verre, la résine, l'air sec à la première. Mais la division n'est pas parfaitement nette car il existe bien des matières qui relient ces deux séries. Ce n'est jamais d'ailleurs qu'une question de plus ou moins grande conductibilité, car aucune substance ne s'oppose complètement au passage de l'électricité.

Nous trouvons parmi les bons conducteurs :

Les métaux;
Le charbon calciné;
La plombagine;
Les acides;
Les solutions salines;
Le corps de l'homme et des animaux, etc.

Dans les mauvais conducteurs :

Le verre;
Le soufre;
La résine;
La paraffine, etc.

Comme conséquences de la distinction établie, nous voyons que :

1° Deux bons conducteurs réunis l'un à l'autre, se partagent leur électricité et cela toujours de la même façon quels que soient les points de contact;

2° Deux mauvais conducteurs mis en contact n'échangent leur électricité qu'entre leurs points directement touchés;

3° Un bon conducteur, un métal par exemple, ne peut accuser l'électrisation si on le frotte en le tenant en main, car la conductibilité du corps et celle de l'opérateur établissent une communication permanente du métal avec le sol.

Usage des mauvais conducteurs. — On a besoin souvent de maintenir l'électricité dans les conducteurs; on y arrive par l'emploi de ce qu'on appelle les *isolants*. Pour les cas ordinaires, on fait usage du verre; mais pour voir ce corps remplir efficacement son rôle, on doit éviter l'humidité qui se condense à sa surface; sinon la communication s'établit aisément par cette petite nappe liquide. Il faut donc dessécher l'air qui environne les supports; on y arrive par la chaleur, mais on évitera de trop chauffer pour empêcher le verre de perdre une bonne partie de ses propriétés isolantes. Sont d'ailleurs plus mauvais conducteurs que le verre, et par ordre de propriété croissante : la gutta-percha, la gomme-laque, le bois de chêne sec, l'ébonite, la paraffine et surtout l'air parfaitement sec.

Il existe deux espèces d'électricité. — Tous les corps peuvent s'électriser par le frottement, mais tous n'ont pas alors exactement les mêmes propriétés. Pour le montrer, prenons deux pendules électriques formés chacun d'une petite balle de sureau suspendue par un fil de soie, à une tige isolante.

Frottons, au moyen d'une peau de chat, un bâton de cire et approchons-le du premier pendule ; nous voyons une attraction du sureau (fig. 1), puis, après contact, une répulsion (fig. 2). Le premier temps de l'opération nous est connu ; le contact permet le partage de l'électricité entre le bâton et la balle : la répulsion qui suit est la conséquence de ce partage.

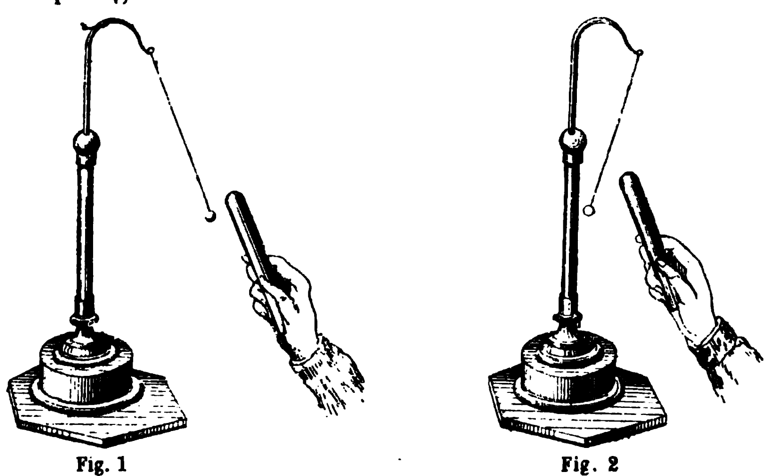


Fig. 1 Fig. 2

Nous pouvons ensuite répéter la même expérience avec une baguette de verre frottée et le second pendule ; les phénomènes sont identiques.

Ainsi nous avons un pendule qui a partagé l'électricité de la cire, un autre qui tient la sienne du bâton de verre et chaque balle est repoussée par le corps qui l'a électrisée. Si ensuite nous approchons le verre frotté du premier pendule et la cire du second, nous observons deux attractions.

Le verre et la cire présentent donc des qualités inverses en quelque sorte. On dit que leurs *électricités sont différentes*. Il y a donc au moins deux sortes d'électricité et nous pourrions même espérer en trouver davantage. Mais l'expérience nous enseigne que toute matière frottée se comporte, soit comme le verre, soit comme la cire : elle attire l'un des pendules et repousse l'autre. Son électricité est donc identique à celle du verre ou à celle de la cire. Nous en conclurons :

Il existe deux espèces d'électricité et il n'en existe que deux.

Celle du verre et des corps qui se comportent de même s'appelle *électricité positive* ou +; celle des corps qui agissent comme la cire : *électricité négative* ou —.

C'est d'ailleurs là simplement une façon de parler et il serait peut-être plus exact de dire qu'*il y a deux états différents d'électrisation*. Suivant une hypothèse faite par Franklin, tout corps possède une quantité normale d'électricité ; dans ce cas il ne présente pas l'état d'électrisation. Si la dose d'électricité est supérieure à la quantité normale, le corps est électrisé positivement ; il est négatif quand la charge est inférieure à la normale.

En général, dans le frottement, le corps frotté et le corps frottant s'électrisent l'un positivement et l'autre négativement.

CHAPITRE II

ATTRACTIONS ET RÉPULSIONS ÉLECTRIQUES

Sens de ces actions. — Si nous reprenons l'expérience précédente, nous voyons l'un des pendules, celui qui a touché le verre par exemple, repoussé par le verre et attiré par la cire. Ainsi ce sureau électrisé positivement est repoussé par un corps chargé également d'électricité + et attiré au contraire par un autre qui porte l'électricité —. Le pendule négatif nous montre un fait semblable : l'électricité négative le repousse ; l'autre l'attire.

En généralisant ces actions, nous énoncerons les deux lois :

1° *Deux corps semblablement électrisés se repoussent* ;

2° *Deux corps chargés d'électricité de nom contraire s'attirent mutuellement.*

Grandeur des actions électriques. — Deux corps électrisés, situés à une certaine distance l'un de l'autre, s'attirent ou se repoussent comme on vient de le dire. La grandeur de cette action dépend évidemment de deux choses :

1° Du degré d'électrisation des deux corps ;

2° De leur distance.

Si le degré d'électrisation était mesurable, nous pourrions voir son influence sur la force électrique, pour une distance invariable. Cette observation et l'étude de la force en fonction de la distance nous donneraient expérimentalement deux lois numériques.

Influence du degré d'électrisation. — Quantité d'électricité. — En réalité la seule façon de juger le degré d'électrisation consiste à mesurer la grandeur de la force attractive ou répulsive, pour une distance donnée et si l'action est intense, nous dirons que les corps sont fortement électrisés. Mais il s'agit de préciser davantage et de représenter par des nombres ce degré d'électrisation.

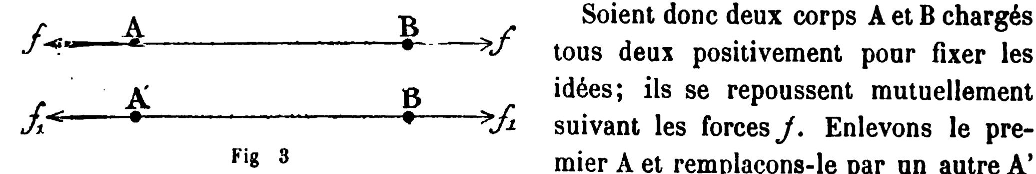


Fig 3

Soient donc deux corps A et B chargés tous deux positivement pour fixer les idées; ils se repoussent mutuellement suivant les forces f. Enlevons le premier A et remplaçons-le par un autre A' (sans changer les positions). En général, les forces varient : de f, elles deviennent f_1 ; si f_1 est double de f, nous convenons de considérer le degré d'électrisation de A'

comme le double de celui de A ; si la force est triplée, le *degré* ou encore la *masse*, la *charge*, la *quantité d'électricité* de A' égale trois fois le degré, la masse, la charge ou la quantité d'électricité de A. D'une manière générale la *quantité* d'électricité de l'un des corps, toutes choses égales d'ailleurs, est comptée proportionnellement à la force *mesurable* qui s'exerce entre les deux. On conçoit la possibilité de prendre l'une de ces quantités comme unité, ce qui permet d'évaluer numériquement le degré d'électrisation. Nous y reviendrons plus tard.

Le même raisonnement peut être tenu pour le deuxième corps B, ce qui montre la proportionnalité de la force aux deux charges de A et de B.

D'après cette convention, on érige donc la loi :

Les actions électriques sont proportionnelles au produit des quantités d'électricité que possèdent les deux corps en présence.

Influence de la distance. — Loi de Coulomb. — Cette seconde loi s'établit expérimentalement, au moyen de la balance de Coulomb. Cet appareil (fig. 4) comprend essentiellement une aiguille isolante munie à son extrémité d'une petite balle de sureau A et équilibrée convenablement. Cette aiguille est mobile, suspendue par un fil *métallique* au centre d'un cercle divisé C qui tourne devant un index fixe D. On peut donc, par le déplacement de ce petit disque, tordre plus ou moins le fil et équilibrer ainsi les forces électriques. Le tout est enfermé, dans une cage de verre graduée sur son pourtour.

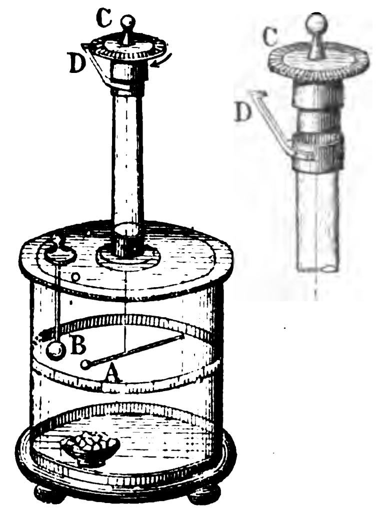


Fig. 4

On commence par mettre l'aiguille devant le zéro de la bande, puis on introduit dans la balance par un trou qui correspond au zéro, une sphère électrisée B qui électrise par contact la balle A : une répulsion résulte de cette électrisation et l'aiguille s'arrête à une distance angulaire α de sa première position (fig. 5). Alors le fil est tordu et sa torsion α fait équilibre à la force répulsive de B sur A.

D'après les lois de la torsion, on peut dire que cette force est proportionnelle à l'angle α ; donc :

$$\text{Répulsion à la distance } \alpha = C\alpha.$$

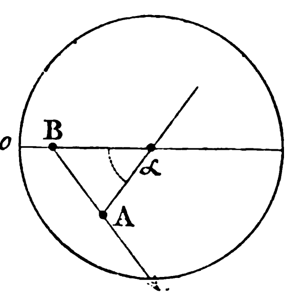


Fig. 5

On peut ensuite se proposer de réduire la distance des deux corps et pour cela il faut tourner le cercle C dans le sens de A vers B. Arrêtons cette rotation quand la distance angulaire est amenée à la valeur $\frac{\alpha}{2}$, moitié de la première. Nous trouvons qu'il a fallu tourner le cercle d'un

angle T de sorte que la torsion totale égale maintenant T augmenté de $\frac{\alpha}{2}$ (qui reste à parcourir jusqu'à la position première de l'aiguille).

La force de torsion, qui mesure la :

$$\text{Répulsion à la distance } \frac{\alpha}{2} = C\left(T + \frac{\alpha}{2}\right)$$

Or l'expérience montre que :

$$T + \frac{\alpha}{2} = 4\,\alpha$$

l'action à la distance α est donc quadruple de la première ; de même à une distance $\frac{\alpha}{3}$, l'effort devient neuf fois plus grand que dans le premier cas. En généralisant ce résultat, on énonce la loi de Coulomb :

Les attractions et les répulsions électriques sont en raison inverse des carrés des distances.

Expression de la force électrique. — Appelons q et q' les quantités d'électricité de A et de B, r leur distance. Les deux lois énoncées nous permettent d'écrire :

$$f = K\,\frac{q \times q'}{r^2}$$

où K est une quantité constante.

On convient généralement d'affecter q et q' de signe : quand ces nombres représentent de l'électricité positive, on les prend positivement ; ils sont négatifs dans le cas contraire.

D'après cela si q et q' sont tous deux positifs ou tous deux négatifs, f est plus grand que zéro ; c'est le cas de la répulsion (électricité de même nom). Au contraire, les deux charges étant de nature différente (attraction) le produit devient négatif. Le sens de la force est donc en rapport intime avec le signe du produit.

Cette formule, dite de Coulomb, est fondamentale.



CHAPITRE III

DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ

L'électricité restant, dans les isolants, localisée aux points frottés, le problème actuel s'applique seulement aux corps bons conducteurs.

L'électricité se porte uniquement à la surface extérieure. — Ce point fondamental s'établit expérimentalement :

1° Soit une sphère de cuivre isolée et électrisée A (fig. 6). Touchons-la avec deux hémisphères creux également isolés B et C; nous emportons ainsi toute l'électricité de la boule, ce qui s'explique par une distribution superficielle extérieure au moment où noyau et enveloppes forment un conducteur unique.

2° Prenons une sphère creuse percée d'un trou (fig. 7); elle présente une surface extérieure et une autre interne. Au moyen d'une petite balle isolée nommée *sphère d'épreuve*, on peut toucher divers points en dedans ou en dehors et puiser ainsi une certaine quantité d'électricité si le

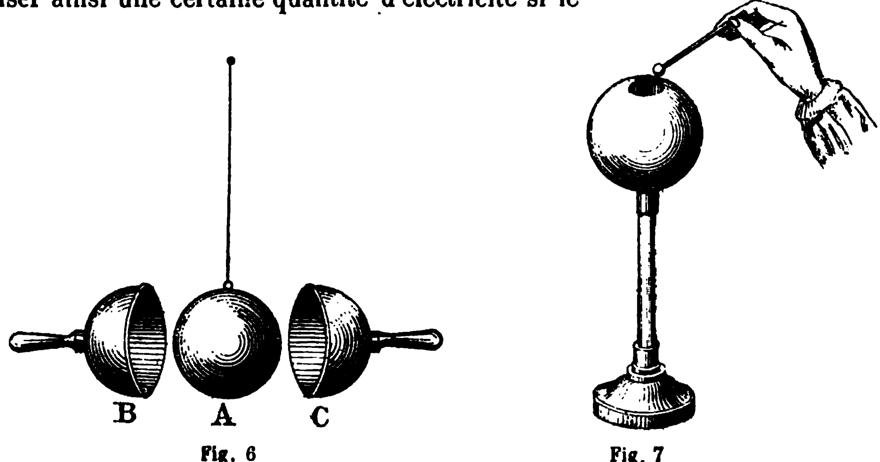


Fig. 6 Fig. 7

point de contact est chargé; un pendule électrique met cette charge en évidence. On constate, par cette méthode, l'absence d'électricité en tous les points intérieurs; le tout réside à la surface extérieure.

3° Soit une cage métallique isolée sur pieds de verre; électrisée au moyen d'une machine, elle manifeste extérieurement les phénomènes ordinaires. A l'intérieur, au contraire, on ne peut déceler l'électricité même avec les appareils les plus sensibles.

Il n'est d'ailleurs pas nécessaire que l'enveloppe soit continue ; un simple grillage, une cage d'oiseau suffit à montrer le phénomène; on a disposé intérieurement et extérieurement des bandes de papier pendant le long des parois. Les premières restent au repos tandis que les autres sont fortement soulevées. Ainsi nous pourrons énoncer le principe :

L'électricité se porte uniquement à la surface extérieure des conducteurs.

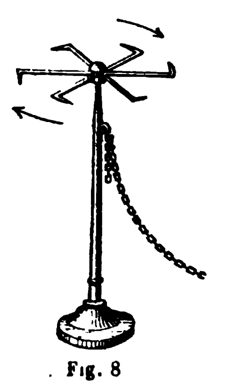
Mode de distribution à la surface extérieure. — La forme du corps influe sur le mode de distribution. Pour faire cette étude, on emploie un *plan d'épreuve*, petit disque de clinquant tenu par un manche isolant. On applique cette lame successivement sur diverses régions du corps étudié et on évalue, par la balance de Coulomb, la quantité d'électricité puisée, d'où la charge de la portion touchée. En coordonnant tous les résultats on arrive aux conséquences suivantes :

La distribution sur une sphère est uniforme ; l'électricité est répandue régulièrement et cela doit bien être par raison de symétrie.

Sur un ellipsoïde, les extrémités du grand axe sont plus chargées que tous les autres points et la différence s'accentue à mesure que l'on prend une figure plus allongée.

Quand l'ellipsoïde est suffisamment étiré, il présente de véritables pointes et la charge de ces parties croît d'une façon démesurée.

Pouvoir des pointes. — Or les particules d'électricité, si on peut s'exprimer ainsi, se repoussent mutuellement (leur répartition à la surface extérieure des conducteurs en est une conséquence). Elles font effort pour s'échapper du corps si le milieu extérieur le permet et exercent ainsi une *pression électrique*. En vertu de cette tendance, des fuites d'électricité doivent se déclarer là où la charge est forte, aux pointes surtout. Le pouvoir des pointes est mis en évidence de plusieurs façons :


Fig. 8

1° Au fur et à mesure de l'écoulement, l'air environnant se charge d'électricité. Cet air électrisé est vigoureusement repoussé par la pointe elle-même et il en résulte un vif courant d'air, suffisant pour éteindre une bougie ;

2° Un système, mobile sur un axe, et formé de pointes inclinées toutes de la même manière, prend un mouvement rapide de rotation si on le relie à un corps électrisé. Ce petit *tourniquet électrique* se meut en sens contraire de la direction des pointes sous la réaction de l'air électrisé (fig. 8).

Ainsi une pointe doit produire une décharge rapide du corps dont elle fait partie. Dans tous les appareils d'électricité, on évite cette forme allongée ; on proscrit pour la même raison, toute arête vive : on arrondit les angles et les arêtes.

CHAPITRE IV

INFLUENCE ÉLECTRIQUE

Champ électrique. — Soit un corps électrisé ; l'action qu'il exerce sur un pendule léger se fait sentir jusqu'à une certaine distance autour du conducteur. En supposant cet appareil indicateur très sensible, nous délimitons dans l'espace toute une région où s'exerce l'action du corps électrisé : ce volume constitue le *champ électrique* du conducteur.

Expérience fondamentale de l'influence. — Tout corps conducteur s'électrise quand on le place dans un champ électrique. Ce procédé s'appelle *électrisation par influence ;* le corps d'abord électrisé est l'*inducteur ;* l'autre, celui que l'on approche du premier, est l'*induit*.

On réalise l'expérience avec une sphère A réunie à une machine, et avec un corps BC isolé complètement. On a muni ce dernier de doubles pendules à fils conducteurs. Par ce moyen, deux petites balles en contact s'écartent d'autant plus fortement qu'elles correspondent à une partie plus chargée du corps induit et on se rendra compte du mode de distribution de l'électricité. Voici dès lors ce qu'on observe :

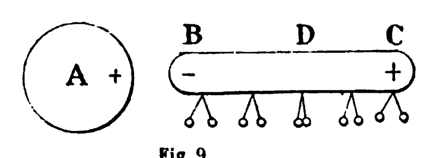


Fig. 9

Aux extrémités du cylindre, la charge est maxima ; dans la partie moyenne D, le corps est neutre. On peut d'ailleurs constater en outre que la région B contient l'électricité négative, C l'électricité +.

Ainsi l'influence développe les deux espèces d'électricité, qui se disposent suivant leurs actions réciproques (+ et — en regard).

Montrons maintenant *que les deux quantités d'électricité ainsi produites sont équivalentes :* il suffit d'éloigner le corps inducteur ; tous les pendules retombent accusant ainsi la neutralité du corps BC par suite de la combinaison des deux électricités.

Nous pouvons donc dire, pour résumer le phénomène : l'*influence développe sur un corps neutre autant d'électricité positive que d'électricité négative.*

Supposons maintenant que l'on vienne à toucher le corps induit pendant qu'il est soumis à l'influence de la sphère ; nous établissons ainsi une communication avec la terre, permettant à l'électricité repoussée c'est-à-dire positive de s'écouler ; il reste

alors uniquement sur BC l'électricité négative (contraire à celle de A) qui est dans la région B. Que l'on enlève ensuite l'inducteur, après avoir coupé la communication avec le sol, la neutralité ne peut plus être obtenue : le corps reste négatif mais son électricité se répartit sur toute la surface extérieure et suivant la forme de cette surface. Nous avons là un moyen commode pour multiplier en quelque sorte les quantités d'électricité.

Cas particulier d'influence. — Soit A un corps électrisé entouré d'une enveloppe conductrice comme le suppose la figure 10. L'influence développe dans la matière du contenant les deux électricités + et —. Une seule d'ailleurs est maintenue si l'enveloppe est reliée au sol; la surface extérieure est alors neutre et tout objet situé au dehors est à l'abri de l'influence de A. On a là un *écran électrique*. Les murs d'une salle en tiennent lieu en général.

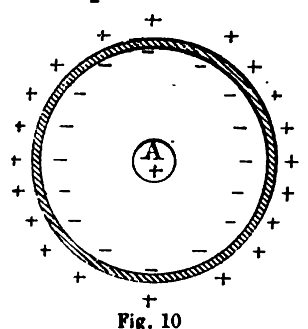


Fig. 10

Applications de l'influence électrique. — Nous aurons occasion d'appliquer souvent le principe de l'influence ; pour le moment nous examinerons l'attraction des corps légers par l'électricité et le principe des électroscopes.

Attraction des corps légers. — Nous allons expliquer ce phénomène fondamental. Soit un corps électrisé A portant une charge positive. Approchons le d'un corps neutre B, un pendule électrique isolé, par exemple. L'influence développe les charges $+ m$ et $- m$ dans les régions figurées et deux forces électriques en résultent :

A repousse la masse $+ m$
et attire la masse $- m$

Si les distances de A à $+ m$ et à $- m$ étaient égales, les deux forces auraient même grandeur, d'après la loi de Coulomb, mais il n'en est rien; l'écart des deux charges de même nom est supérieur à l'autre : l'attraction l'emporte donc sur la répulsion et le pendule est en définitive attiré vers A.

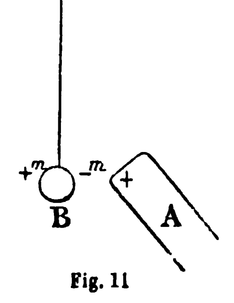


Fig. 11

Si le corps léger n'est pas isolé, les phénomènes changent un peu ; la quantité $+ m$ passe au sol et rien ne contre-balance, dans ce cas, l'attraction des électricités contraires ; le mouvement du corps se trouve donc facilité.

Electroscope. — C'est un appareil qui permet :

1° De voir si un corps est électrisé ;

2° De déterminer la nature de cette électricité.

L'instrument se compose essentiellement d'une tige de cuivre isolée terminée en haut par un bouton, en bas par deux lames d'or, prises dans une feuille à dorure, et

pincées par leur extrémité supérieure seulement (fig. 12). A l'état neutre, ces feuilles se touchent tout naturellement ; chargées d'électricité, elles se repoussent mutuellement formant ainsi un certain angle. La tige de suspension est soutenue par une cloche de verre mise à l'abri des dépôts de buée, extérieurement par une couche de vernis, à l'intérieur par dessiccation de l'air.

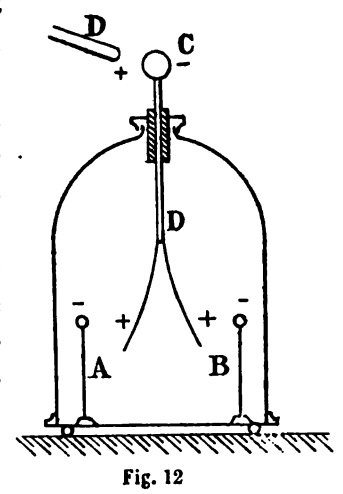


Fig. 12

La cloche repose sur un plateau de métal qui porte deux bornes A et B également conductrices, destinées à augmenter par le phénomène d'influence, l'écart des feuilles d'or et à empêcher leur projection sur la surface du verre.

Supposons que l'on approche de la boule C le corps D électrisé positivement ; l'influence fait naître, dans la tige CD et dans les lames légères, les deux électricités contraires — et +. Cette dernière, repoussée dans les feuilles, produit un écartement plus ou moins fort de ces parties mobiles et l'effet est augmenté par la présence des bornes.

Ainsi, en résumé, un écart des feuilles accuse l'état d'électrisation du corps approché.

Il s'agit maintenant de déterminer la *nature* de cette électricité. Pour cela, *pendant que le corps est à proximité de la boule* C, on touche ce bouton avec le doigt. On fait ainsi écouler dans le sol l'électricité positive de l'électroscope, c'est-à-dire celle des feuilles que l'on voit retomber. Cela fait, on retire le *doigt d'abord ;* on éloigne le corps D ensuite. A ce moment plus rien ne retient dans la boule l'électricité — laissée dans l'appareil ; cette charge se répartit dans tout le conducteur et aussi dans les lames d'or qui divergent de nouveau (elles sont maintenant toutes deux négatives).

Ensuite, on prend un morceau d'*ébonite* ou de *cire,* on le frotte puis on l'approche à une certaine distance de l'électroscope en opérant *lentement.* On agit ainsi sur l'électricité de l'appareil :

1° Si cette électricité est négative, comme nous l'avons supposé, elle est refoulée par l'ébonite (qui est aussi négative) dans les parties les plus lointaines, c'est-à-dire dans les feuilles qui s'*écartent davantage.* Ce phénomène accuse donc un corps étudié chargé positivement ;

2° La divergence peut, au contraire, *diminuer ;* cela indique que l'électroscope est chargé positivement, car son électricité est alors attirée par celle de l'ébonite. Le corps qui a produit cette charge est donc lui-même négatif.

Ainsi, en résumé, si l'on suit la marche indiquée :

Un accroissement de divergence indique un corps chargé positivement ;

Une diminution accuse un corps négatif.

Suivant l'écart des feuilles au moment où le corps est approché, on peut se rendre compte du degré d'électrisation ; l'appareil reçoit alors une graduation et change son nom contre celui d'*électromètre.*



CHAPITRE V

POTENTIEL ÉLECTRIQUE

Nous avons notion de la *quantité d'électricité*, mais il faut aussi considérer dans quel *état* se trouve cette charge électrique.

Une comparaison va nous montrer de suite l'utilité de cette seconde donnée.

Supposons que l'on utilise une chute d'eau pour faire mouvoir un moteur, une turbine par exemple. Nous pouvons connaître le poids d'eau que nous avons en réserve mais cela ne suffit pas et il nous sera impossible de calculer le travail dont nous disposons si nous ne savons pas de quelle *hauteur* le liquide va tomber.

Les phénomènes électriques sont analogues à la chute d'eau ; ils consistent en déplacements dont nous pouvons retirer de l'énergie et il nous manque le renseignement analogue à la hauteur de chute. Nous allons le chercher.

Expérience fondamentale. — Montrons d'abord qu'il existe pour l'électricité d'un conducteur une constante qui caractérise l'état de cette électricité.

Prenons un corps de forme quelconque, l'induit cylindrique soumis à l'influence d'une sphère électrisée par exemple. Nous savons que la distribution électrique n'est pas uniforme ; il y a une région positive, une autre négative, une troisième neutre. Malgré cela, ces diverses charges sont dans un même état électrique. Soit en effet un plan d'épreuve relié, par un fil fin, à la boule d'un électroscope ; nous pouvons déplacer le petit plan sur la surface du conducteur : les feuilles marquent une certaine déviation et cet écart se maintient invariable quel que soit le point touché ; il faut donc bien admettre que l'on évalue ainsi l'état général électrique du conducteur. Cet état peut s'exprimer numériquement si l'on convient de représenter par 1, 2, 3, etc., les écarts croissants des feuilles d'or.

Ainsi présenté, cet état s'évalue aussi bien que la température en chaleur ; mais nous lui donnerons plus tard une signification beaucoup plus précise.

Intensité d'un champ électrique. — Nous avons déjà défini le champ électrique. Pour étudier ce champ, il faut opérer sur tous ses points : mettre en chacun d'eux un certain corps électrisé et voir comment il se comporte. Ordinairement c'est l'unité d'électricité positive qu'on emploie. Placée en un point du champ, elle est soumise à une force mesurable : c'est l'*intensité du champ* ou simplement la *force* en ce

point. Cette force est visiblement variable en grandeur et en direction d'une région à une autre; elle est due à toutes les charges électriques qui constituent le champ et change forcément quand on s'écarte plus ou moins de ces masses.

Ligne de force. — Partons d'un point M du champ où la force est f en grandeur et en direction. Déplaçons-nous suivant f d'une quantité infiniment petite; au nouveau point M', la force est f' inclinée plus ou moins sur f. Suivons cette nouvelle ligne jusqu'en M'' infiniment voisin de M'; là se produit un changement et il en est en général indéfiniment de même dans tout le champ. La route polygonale que nous avons suivie est sensiblement courbe à cause de la petitesse des segments MM', M' M'', etc. Cette courbe est ce qu'on appelle une *ligne de force;* elle se définit comme *tangente à la force en tous ses points*. La considération des lignes de force nous conduit à quelques réflexions :

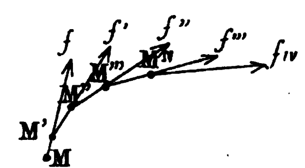


Fig. 13

1° *En chaque point du champ existe une ligne de force.* Il faut cependant une restriction pour les corps conducteurs que le champ peut contenir. Les lignes de force ne sauraient en effet pénétrer là où la force n'existe pas. Or, nous savons qu'à l'intérieur d'un conducteur, l'action électrique est nulle (voir page 8). Les lignes s'arrêtent brusquement à la surface de ces conducteurs lesquels sont d'ailleurs des portions inactives du champ.

2° *En un point du champ, la ligne de force est unique ;* elle l'est comme la force qui a *une* direction parfaitement déterminée ;

3° *Les lignes de force sont normales à la surface des conducteurs.* Si la force était en effet oblique à la surface extérieure, un déplacement tangentiel d'électricité se produirait, ce qui est contraire à l'hypothèse de l'équilibre.

Fonction potentielle. — Nous avons défini l'état électrique d'un conducteur d'une façon assez vague ; il s'agit maintenant de préciser.

Considérons, dans un champ, un corps de petite dimension O portant l'unité d'électricité ; il est soumis à une force connue (qui est d'ailleurs l'intensité du champ en ce point). Si nous voulons avoir l'état de cette électricité-unité, nous l'abandonnons à elle-même : elle se déplace suivant le sens de la force et finit par sortir du champ électrique. Dans ce mouvement, s'accomplit un travail que nous pouvons mesurer et ce travail est intimement lié à l'état de l'électricité transportée, de même que l'énergie produite par la chute d'un kilogramme d'eau dépend exclusivement de la hauteur de la chute et égale même cette hauteur. Pour le cas de l'électricité nous allons donc exprimer le travail accompli et nous pourrons prendre sa valeur pour mesure de l'état électrique de Q. Nous montrerons donc (voir page 16 si on ne veut pas suivre les calculs) que :

Le potentiel d'un conducteur (c'est ainsi qu'on désigne l'état électrique) *est le*

travail effectué par l'unité d'électricité allant du corps jusqu'en dehors du champ ou pratiquement jusqu'au sol.

Supposons le champ dû à des masses électriques $m\,m'\,m''$... les unes positives, les autres négatives situées à des distances respectives r, r', r''... du point O. Les forces $f, f' f''$... de ces charges sur le point O muni de l'unité d'électricité positive, sont les unes répulsives, les autres attractives. Elles ont pour valeurs, en remarquant que la masse de O égale l'unité :

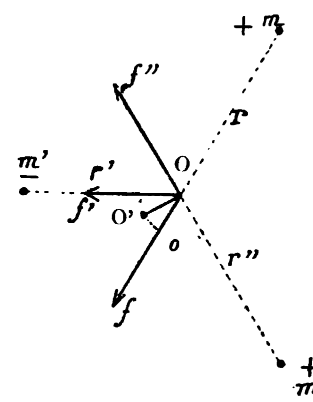


Fig. 14

$$f = K\frac{m}{r^2}$$

$$f' = K\frac{m'}{r'^2}, \text{ etc.}$$

Si l'on déplace O jusqu'en O', d'une quantité infiniment petite, chaque force effectue un travail élémentaire qui peut être positif ou négatif, c'est-à-dire produit ou absorbé. Considérons seulement d'abord celui de f : c'est le produit de f par la projection Oo du déplacement sur la force :

$$dT = f \times Oo$$

A un infiniment petit d'ordre supérieur près, Oo est la variation de distance mO' — mO soit dr. Nous écrirons donc :

$$dT = f \times dr$$

en valeur absolue.

Mais f et dr sont tous deux susceptibles de signes. Pour traiter cette question des signes, nous remarquons que dT est *produit* et par conséquent > 0 quand le déplacement et la force sont dirigés dans le même sens. Alors si f est une répulsion $(f > 0)$, r doit augmenter $(dr > 0)$; si f est attractive $(f < 0)$ r doit diminuer $(dr < 0)$. Au contraire le travail est *absorbé* $(dT < 0)$, si déplacement et force sont de sens opposé : pour $f > 0$, répulsion, r diminue : $dr < 0$ et pour $f < 0$, attraction, r augmente, $dr > 0$ comme l'indiquent les schémas suivants :

Travail produit par { Force repulsive: m .... O dr>0 o ——> f>0 ; O'
Force attractive: m f<0 <—— o dr<0 O ; O' }

Fig. 15

Travail absorbé par { Force répulsive: m .... o dr<0 O ——> f>0 ; O'
Force attractive: m f<0 <—— O dr>0 o ; O' }

Fig. 16

Dans tous les cas on voit que le travail est produit si la force et le déplacement sont de même *signe;* il est absorbé quand f et dr sont de signe contraire. Ainsi la formule :

$$dT = f \times dr$$

nous donne dT avec son signe. Écrivons donc :

$$dT = K.\frac{m}{r^2}dr$$

On peut même, comme on le verra plus tard, faire disparaître le coefficient K si l'on choisit convenablement l'unité électrique. Alors :

$$dT = \frac{m}{r^2}dr$$
$$= -d\left(\frac{m}{r}\right)$$

car on reconnaît dans $\frac{dr}{r^2}$ la différentielle de : $-\frac{1}{r}$.

Les autres travaux élémentaires s'écrivent de même

Pour f': $\qquad dT' = -d\left(\frac{m'}{r'}\right)$

Pour f'': $\qquad dT'' = -d\left(\frac{m''}{r''}\right)$, etc.

Le travail dû au déplacement infiniment petit est donc, pour toutes les forces réunies :

$$d\mathfrak{T} = -d\left(\frac{m}{r}\right) - d\left(\frac{m'}{r'}\right) - d\left(\frac{m''}{r''}\right) - \ldots\ldots$$
$$= -d\left(\frac{m}{r} + \frac{m'}{r'} + \frac{m''}{r''} + \ldots\ldots\ldots\right)$$

La somme entre parenthèses s'appelle la *fonction potentielle.* On la désigne par V.

$$V = \frac{m}{r} + \frac{m'}{r'} + \frac{m''}{r''} + \ldots$$

En un point du champ, sa valeur s'obtient en faisant la somme des quotients de chaque charge par sa distance au point considéré.

Cette fonction, qui joue un très grand rôle en électricité, possède quelques propriétés importantes :

1° Dans un déplacement infiniment petit du point, *le travail obtenu $d\mathfrak{T}$ a pour* valeur :

$$d\mathfrak{T} = -dV$$

c'est-à-dire la *variation changée de signe de la fonction potentielle;*

2° Si le déplacement est fini, le travail est la somme d'une suite de travaux élémentaires :

$$\mathfrak{T} = -\int dV = -(V' - V)$$
$$= V - V'$$

V' étant la valeur de la fonction pour la position finale du point O, d'où cette conclusion pratique :

Le travail produit dans un déplacement fini de l'unité d'électricité égale la différence entre la valeur initiale et la valeur finale de la fonction potentielle.

Ce travail est indépendant, comme on le voit, du trajet accompli ; il ne dépend que des positions initiale et finale ;

3° Comme déplacement particulier, sortons la quantité unité du champ électrique de manière à atteindre une région où $V' = o$; le travail produit est V, potentiel du point de départ. C'est le maximum qu'on puisse exécuter ; ce qui justifie bien le nom de *potentiel* donné à la fonction. Ainsi, nous prendrons pour définition :

Le potentiel en un point est le travail produit par l'unité d'électricité déplacée depuis ce point jusqu'à l'infini ou pratiquement jusqu'au sol ;

4° Supposons réunis par un conducteur deux corps A et B à des potentiels différents V et V'. Aucun secours n'est fourni à l'électricité ; le mouvement doit donc être spontané et *produire* du travail, ce qui exige le passage de A à B si $V > V'$. Alors le travail *effectué* est :

$$V - V'$$

par unité électrique transportée.

On généralise ce résultat en disant que :

D'elle-même l'électricité passe toujours d'un potentiel à un autre moins élevé que le premier et le travail qu'elle produit égale, pour une charge unité, la différence de ces deux potentiels.

Elle ne saurait marcher en sens contraire quand on ne lui fournit pas d'énergie étrangère.

La différence des potentiels, cause du déplacement, s'appelle *force électromotrice*.

Le potentiel représente bien l'état électrique. — Cet état a été défini provisoirement par la déviation plus ou moins grande des feuilles d'un électroscope relié au conducteur. Mais cet écart n'est que la manifestation du passage à l'électroscope d'une certaine charge électrique. Or ce transport est d'autant plus considérable que le potentiel est plus fort d'après ce qui vient d'être dit ; donc la divergence des feuilles légères augmente avec le potentiel du conducteur, et le potentiel peut servir à caractériser l'état électrique ; en prenant la valeur de V, pour mesure de cet état, nous ne faisons que remplacer notre évaluation première arbitraire par une autre bien fondée.

Surfaces équipotentielles. — D'un point à l'autre du champ, le potentiel est variable. Il est cependant possible de trouver des points au même potentiel et leur ensemble constitue en général une surface que l'on nomme *équipotentielle*. Évidemment à chaque valeur V correspond une telle surface. Soient S, S', S''... ces diverses



surfaces répondant à V, V', V''... (V > V' > V''...). L'électricité peut d'elle-même passer de S à S' et à S'', mais le trajet inverse est impossible. Elle n'a pas non plus tendance à se déplacer sur une même surface et nous reconnaîtrons même cette surface équipotentielle à ce caractère que l'électricité y est en équilibre ; nous dirons en particulier que la surface extérieure d'un conducteur chargé est équipotentielle. Il en est de même de tous les points intérieurs, donc tout le conducteur est au même potentiel.

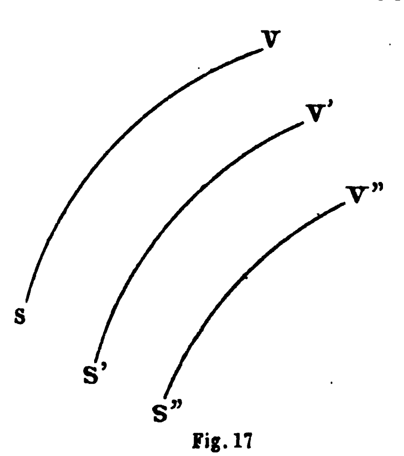


Fig. 17

Comparaison du potentiel à un niveau. — 1° Dans l'écoulement d'un liquide, le travail effectué a pour valeur le produit du poids recueilli par la hauteur de chute ; il est indépendant du chemin suivi par le fluide. Que la descente ait lieu suivant la verticale ou bien qu'elle se fasse par un canal incliné, nous avons toujours la même énergie produite, pourvu que la différence des niveaux et le poids ne changent pas. En électricité nous avons la même chose : le travail engendré est égal au produit de la charge, par la différence des potentiels ;

2° L'énergie potentielle de l'unité de poids d'eau maintenue à la hauteur h au-dessus du sol est h ; c'est le travail maximum qu'on peut demander à cette masse liquide ; celle de l'unité d'électricité au potentiel V est de même V.

3° En outre l'électricité passe d'elle-même toujours d'un potentiel élevé à un autre inférieur, de même qu'un fluide s'écoule d'un niveau à un autre plus bas.

Il y a donc analogie entre le niveau en Pesanteur ou en Hydraulique et le potentiel en Électricité. Ces deux grandeurs comparables présentent la même utilité.

Quand nous disposons d'une chute d'eau, la puissance disponible W dépend de deux facteurs : hauteur de chute h et débit P. On a :

$$W = P \times h.$$

De même, nous ne pouvons calculer la somme d'énergie possédée par un corps électrisé que si l'on nous donne sa charge Q et son potentiel V. Alors :

$$W = V \times Q$$

En vertu de la similitude remarquée, on remplace souvent le mot *potentiel* par *niveau*, qui fait image.

Les surfaces équipotentielles deviennent des *surfaces de niveau* et l'on dit : *l'Électricité ne peut passer d'elle-même d'un niveau à un autre plus élevé ; elle ne peut que se diriger vers un niveau inférieur.*

Relation entre la force électrique et le potentiel. — Nous avons vu que, d'un point du champ à un autre infiniment voisin, le potentiel varie d'une quantité dV

égale, au signe près, au travail $d\mathfrak{T}$ effectué dans le déplacement par la force électrique agissant sur la masse d'électricité unité :

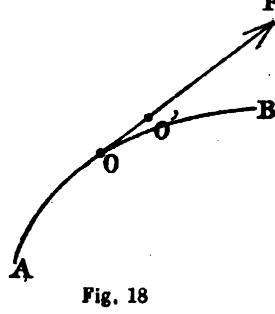


Fig. 18

$$dV = -d\mathfrak{T}$$

Le déplacement supposé peut avoir lieu dans n'importe quelle direction. Prenons-le suivant la force F elle-même, au point O, c'est-à-dire tangentiellement à la ligne de force AB qui passe en O. Ce travail $d\mathfrak{T}$ s'exprime encore par le produit de la force F par le déplacement $OO' = dl$. On a donc :

$$d\mathfrak{T} = F \times dl$$

et :

$$dV = -d\mathfrak{T}$$

d'où :

$$dV = -F \times dl$$

On en déduit :

$$F = -\frac{dV}{dl}$$

d'où ce résultat :

La force électrique en un point du champ égale, au signe près, la dérivée du potentiel dans la direction de la ligne de force qui passe par le point.

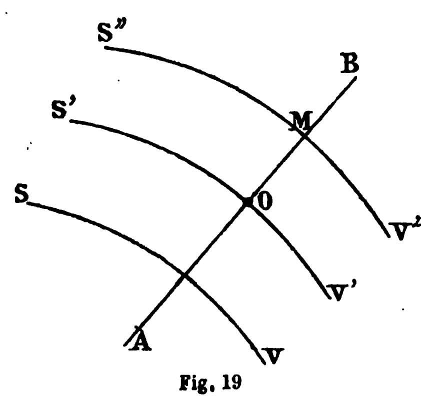


Fig. 19

Pratiquement quand nous voudrons trouver la grandeur de la force, nous évaluerons la diminution de potentiel du point considéré à un autre voisin (sur la même ligne de force) et nous diviserons cette différence par la longueur comprise entre ces deux points. Ainsi par exemple soit AB une ligne de force; nous désirons connaître la force au point O. Il est possible de mener les surfaces de niveau S, S', S" qui correspondent aux potentiels V, V', V" ($V > V' > V''$). La force F se dirige de O vers B ; elle s'obtient approximativement en divisant la diminution : $V' - V''$ quand on passe de O à M, par le chemin OM. On a :

$$F = \text{limite } \frac{V' - V''}{OM}$$

ou sensiblement :

$$F = \frac{V' - V''}{OM}$$

si O M est assez petit.

CHAPITRE VI

MACHINES ÉLECTROSTATIQUES

On nomme ainsi toute source continue d'électricité. Les machines reposent sur les phénomènes de l'électrisation par frottement et de l'influence électrique. Mais l'un ou l'autre peut dominer, ce qui fait distinguer les *machines à frottement* des *machines à influence*.

Ces appareils n'ayant qu'une importance secondaire, nous nous bornerons à une étude très rapide des modèles classiques seulement.

Électrophore. — C'est le générateur d'électricité le plus simple. Il se compose d'un gâteau de résine et de poix A B coulé dans un moule de préférence métallique, et d'un disque C D aussi en métal (ou simplement en bois recouvert d'une feuille d'étain) tenu par un manche isolant M. La forme étant en communication avec la terre, on commence par frotter la résine avec une peau de chat. On l'électrise ainsi négativement puis on place le disque sur A B : l'influence se manifeste comme l'indique la figure 20. A ce moment si on met, au moyen du doigt, le disque en communication avec le sol, l'électricité négative s'écoule et on peut, en soulevant le plateau, après

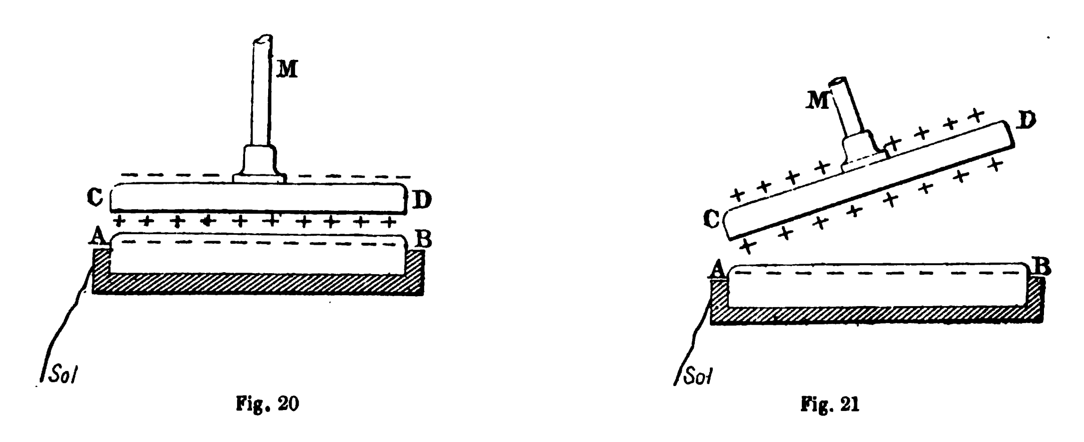


Fig. 20

Fig. 21

avoir retiré la main, emporter une certaine charge électrique positive (fig. 21). On répète la même manœuvre autant de fois qu'on le désire car l'isolant conserve presque indéfiniment l'électricité qu'il a reçue au début.

Machine de Ramsden. — Elle se compose essentiellement (fig. 22):

1° D'un plateau de verre tournant entre deux paires de coussins fixes qui électrisent le verre par frottement ;

2° De conducteurs métalliques destinés à recueillir l'électricité produite, et reliés à des peignes dont les dents sont à petite distance de la roue. Pendant le mouvement, le verre s'électrise positivement et les coussins prennent l'électricité négative qui s'écoule dans le sol par une chaîne. Sur le disque, l'électricité reste aux points frottés ; elle passe vis-à-vis des peignes, agit alors par influence et refoule dans les conducteurs l'électricité positive en attirant à elle celle de nom contraire ; le plateau se trouve ainsi constamment neutralisé et les opérations se reproduisent avec l'autre frotteur. La machine est donc bien une source continue.

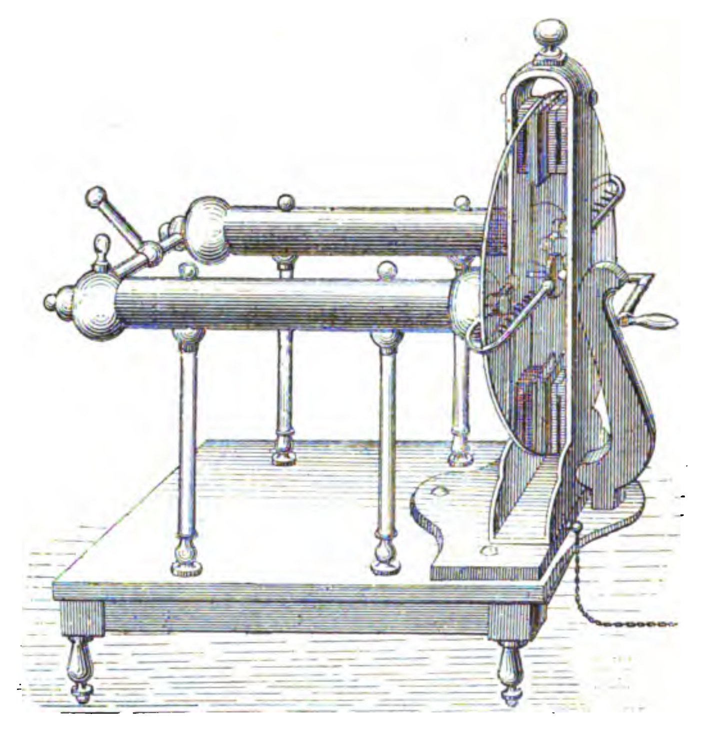


Fig. 22

Quelques précautions sont indispensables dans l'emploi de cette machine.

On garnit les coussins, ordinairement rembourrés de crin, d'un amalgame $Hg - Sn - Zn$ ou encore d'or mussif (bisulfure d'étain).

Les coussins sont reliés au sol par des lames d'étain et une chaine.

Enfin l'humidité ou plutôt le dépôt de buée sur les pieds isolants est combattue par la chaleur.

Machine de Holtz. — Dans la machine précédente, le frottement *produit* sans cesse de l'électricité que l'influence *transforme*. Dans le modèle qui va nous occuper maintenant, on part d'une quantité extrêmement faible d'électricité et on la multiplie

par l'influence (à peu près comme on l'a vu dans l'électrophore). La machine se compose de deux plateaux de verre, l'un fixe et isolé, l'autre mobile autour d'un axe horizontal. Le disque fixe est percé de deux fenêtres diamétralement opposées. Deux armatures de papier symétriquement placées par rapport au centre sont collées sur les bords de ces fenêtres de manière à déborder les ouvertures ; elles se terminent en

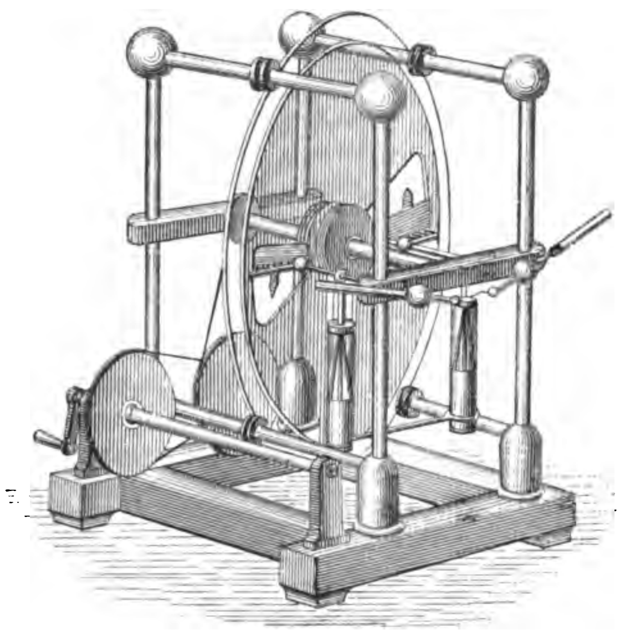


Fig. 23

pointe. Devant ces armatures mais de l'autre côté du plateau tournant, deux peignes sont placés et reliés chacun à un conducteur (ces conducteurs peuvent communiquer par une tige à poignée isolante).

Il s'agit d'abord d'amorcer la machine : on réunit les conducteurs puis on touche l'une des feuilles de papier avec un morceau d'ébonite frotté pendant que l'on entraîne rapidement la partie mobile de manière à aborder les armatures par les pointes. La

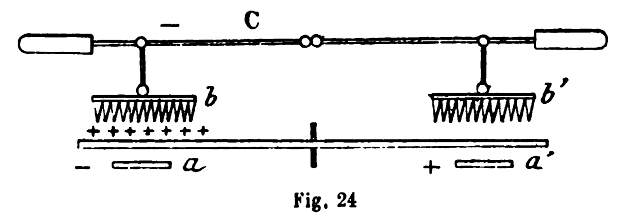


Fig. 24

première a, qui est négative, agit par influence sur le conducteur unique et attire sur le plateau l'électricité +. Cette électricité est entraînée par le mouvement et soutire au peigne b' et à l'armature a' l'électricité — : l'armature a' reste donc positive. Sous ces deux influences combinées (a' et plateau tous deux positifs), le peigne b' charge le verre négativement. Après un nouveau demi-tour, cette quantité se joint à celle de a

pour prendre à *b* l'électricité +, et ainsi de suite. Les actions vont en s'accentuant jusqu'à un état limite : la machine est alors amorcée ; on peut éloigner les deux conducteurs : la partie C, qui perd par son peigne l'électricité +, se charge négativement ; l'autre prend des masses positives.

Souvent, dans le but d'augmenter les effets de la machine, on prend un système double formé de deux disques immobiles et de deux autres tournants. On remarquera que cette machine n'est pas pourvue de conducteurs très développés. Ces conducteurs sont remplacés par deux bouteilles de Leyde.

Machine de Wimshurst. — Elle présente, sur le modèle précédent l'avantage de fonctionner sans amorcement préalable. Ses pièces essentielles comprennent deux disques en verre ou en ébonite tournant en sens inverse. De petits secteurs d'étain sont collés sur le pourtour des plateaux et deux conducteurs diamétraux munis de petits balais touchent successivement les différentes lames ; un conducteur appuie l'un des

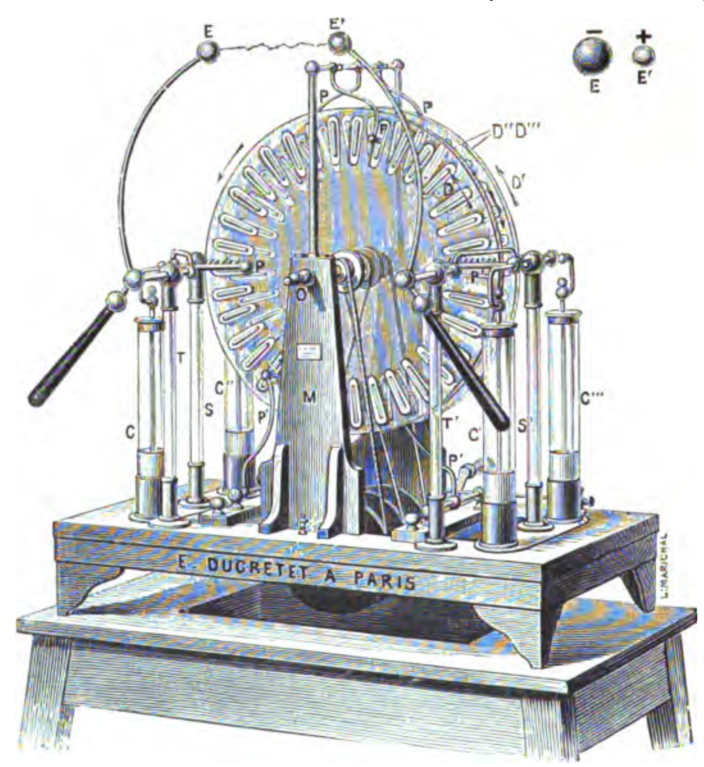


Fig. 25

disques ; l'autre frotte le deuxième et il fait avec le premier un angle qu'on règle par tâtonnement. Les plateaux se meuvent entre deux fers à cheval munis de dents ou de lames tranchantes. Ces deux pièces sont tout d'abord reliées et on les sépare quand la machine commence à débiter l'électricité. Alors des étincelles jaillissent entre les deux conducteurs. Des bouteilles de Leyde peuvent, dans le modèle Ducretet (fig. 25) être retirées à volonté suivant les effets à produire.

On voit, dans ce modèle, quatre plateaux accouplés mais deux seulement sont munis de feuilles d'étain, ces secteurs ayant uniquement pour rôle de rendre la machine autoexcitatrice.

Qualités d'une machine électrostatique. — Elles sont au nombre de deux : le *débit* et le *potentiel.*

Le *débit* est la quantité d'électricité produite par unité de temps; il est proportionnel à la vitesse de rotation.

Le *potentiel* dépend de la disposition des diverses pièces de la machine.

Généralement dans ces machines électrostatiques le débit est petit ; par contre le potentiel est très considérable.

La *puissance* de la machine ou le travail fourni pendant une seconde a pour valeur le demi-produit du débit par le potentiel. Cette puissance est toujours faible. Même en dépensant un travail considérable pour entretenir le mouvement, on ne recueille qu'une énergie minime ; les machines électrostatiques ont un mauvais rendement.

CHAPITRE VII

CONDENSATION DE L'ÉLECTRICITÉ

Capacité d'un conducteur. — Supposons un corps A, éloigné de tout autre conducteur, relié à une source ; il se charge peu à peu et son potentiel croît progressivement et finit par égaler celui de la machine. Alors le système constitué par A et la source a, en tous ses points, le même potentiel ; l'équilibre électrique est établi et la limite de charge est atteinte.

Fig. 26

On recule cette limite si on entoure le corps A d'autres objets reliés au sol. L'influence développe, en effet, sur eux de l'électricité contraire à celle de A et toutes ces masses attirent à elles l'électricité de la machine en augmentant dès lors la charge du corps.

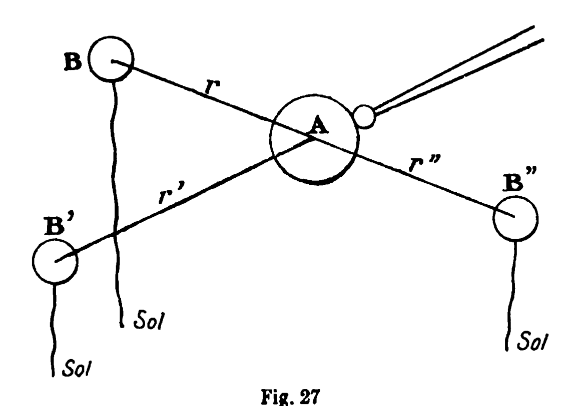


Fig. 27

Ainsi un même corps, en communication avec une machine, se charge très différemment suivant le voisinage qu'on lui donne.

Le potentiel établi sur A, soit V, est donné par la sommation :

$$V = \Sigma \frac{m}{r},$$

m représentant chaque masse électrique et *r* chacune des distances des corps B, B',... à A. Nous avons autant de termes que de corps A, B, B'... (Voir *Fonction* potentielle, page 15).

Supposons doublée la charge de A (par la substitution d'une nouvelle machine à

l'actuelle par exemple). L'influence électrique sur les corps voisins B, B'... augmente dans la même proportion et tous les termes $\frac{m}{r}$ sont doublés ; le potentiel devient 2V ; de même si on triplait la charge de A, on multiplierait par trois son potentiel, d'où la loi :

La charge Q d'un corps, placé dans des conditions déterminées est proportionnelle à son potentiel V.

Ecrivons :

$$Q = C \times V.$$

C est une constante dont voici la signification :

Relions le corps à une machine au potentiel 1, nous lui donnons une charge Q_1.

$$Q_1 = C$$

C représente donc la quantité d'électricité nécessaire pour porter le corps placé dans les conditions données au potentiel unité. Cette constante s'appelle *capacité électrique* du conducteur. Elle ne conserve une valeur invariable que si les conditions sont maintenues. En particulier, quand le conducteur est éloigné de tout autre corps, le nombre C prend une valeur bien déterminée qui est plus spécialement la capacité de A. Nous adopterons la définition :

La capacité d'un conducteur est la quantité d'électricité nécessaire pour porter le corps, éloigné de tout autre conducteur, au potentiel unité.

Condensation de l'électricité. — Nous en avons déjà donné le principe quand nous avons dit que la charge augmente par la proximité des conducteurs unis au sol. Soit par exemple un plateau A chargé positivement d'une quantité Q. Nous en approchons une seconde lame B réunie à la terre ; l'influence localise sur la face interne de B de l'électricité négative qui maintient sur la face de A regardant B l'électricité contraire +. Si la communication existe toujours avec la machine, l'attraction de B se fait sentir également sur les conducteurs de cette machine et l'électricité vient s'accumuler en A. On a là *un condensateur électrique*.

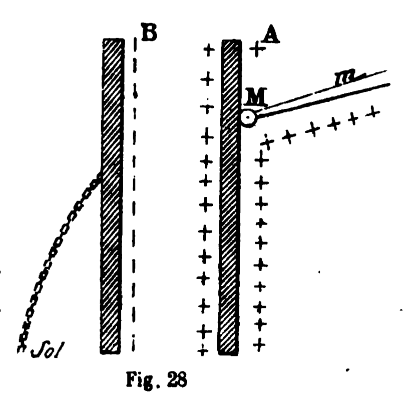


Fig. 28

Capacité d'un condensateur. — Le plateau A, ainsi en présence de B, prend, au potentiel V, une charge électrique Q'. On connaît la proportionnalité de ces deux valeurs V et Q'.

$$Q' = C' \times V$$

C' est la *capacité du condensateur* AB.

La capacité du condensateur est la quantité d'électricité qu'il faut donner à A pour établir sur lui un potentiel unité quand le plateau B communique avec le sol (ou encore pour produire entre A et B une différence de potentiel égale à 1).

Le même plateau A, seul dans l'espace, et relié à la machine, prenait une quantité d'électricité Q et l'on a, si C est alors sa *capacité* :

$$Q = C \times V$$

Le rapport des charges de A dans les deux cas est :

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{C' \times V}{C \times V} = \frac{C'}{C}$$

Il égale le rapport des capacités du corps A : 1° Faisant partie du condensateur ; 2 Isolé. C'est la *force condensante* de l'appareil.

La capacité d'un condensateur varie avec plusieurs circonstances :

1° Elle est proportionnelle à la surface des plateaux ;

2° Sa variation est inverse de la distance des lames. Il ne faut cependant pas trop abuser de ce facteur : si on diminue de plus en plus la séparation des armatures, on risque de voir les électricités se combiner à travers la couche d'air et d'assister par conséquent à la décharge du condensateur. On empêche cet accident en séparant les deux armatures d'une lame de verre un peu plus grande dans tous les sens que les plateaux.

3° La nature de cet isolant interposé influe également sur la capacité. Si l'air est remplacé par une autre substance, la constante est généralement multipliée par un nombre, supérieur à 1, qui est le *pouvoir inducteur spécifique* de la matière. L'isolant a d'ailleurs une autre influence en ce qu'il loge une grande partie de l'électricité confiée aux plateaux. Nous y reviendrons.

Le condensateur que nous venons d'indiquer, avec sa lame de verre, est dit *à plateaux*.

Historique. — Le phénomène de la condensation a été découvert par l'effet du hasard : Cunéus de Leyde voulait électriser de l'eau ; il mit le liquide dans une bouteille qu'il tint en main et fit plonger à l'intérieur une tige reliée à la machine. L'ensemble constituait un condensateur avec l'eau comme armature interne, la main comme armature extérieure ; mais l'attention ne fut attirée que par un fait accidentel : l'opérateur soutenant la bouteille d'une main, vint à toucher, de l'autre main, le conducteur de la source : une commotion violente en résulta car on établissait ainsi une communication entre les deux armatures.

L'expérience répétée ensuite bien des fois puis interprétée a conduit au condensateur à plateaux.

Autres formes de condensateurs. — Une manière simple de réaliser l'instru-

ment consiste à coller de chaque côté d'une lame de verre, deux feuilles d'étain un peu plus petites que l'isolant.

Dans la pratique, on veut des condensateurs de grande capacité et peu encombrants ; on les constitue par des feuilles d'étain séparées par du papier paraffiné. On empile ainsi les lames conductrices de manière qu'elles soient bien isolées les unes des autres mais on a soin de les faire déborder d'un côté du papier : toutes celles de rang pair dépassent à droite, par exemple ; celles d'ordre impair sortent des papiers à gauche. On peut dès lors réunir entre elles toutes les lames paires et d'autre part toutes les feuilles impaires. L'ensemble se comporte donc comme un condensateur de grande surface et par suite de capacité considérable.

Une autre forme de condensateur est la *bouteille de Leyde*. Nous allons l'étudier spécialement.

Bouteille de Leyde. — Elle se compose d'un flacon de verre mince qui tient lieu d'isolant. L'armature interne consiste en feuilles d'or ou de clinquant traversées par une tige de cuivre qui se termine en crochet. L'armature externe est une feuille d'étain collée jusqu'aux trois quarts de la hauteur du vase. Pour charger ce condensateur, on le prend *en main* par la panse et on touche la machine électrique avec l'armature intérieure, ou bien on suspend la bouteille par son crochet au conducteur de la machine et on laisse pendre sur le sol une chaîne reliée à l'armature externe.

On a ainsi de l'électricité positive en dedans et négative sur la feuille extérieure, étant donnée la communication établie avec la terre (fig. 29).

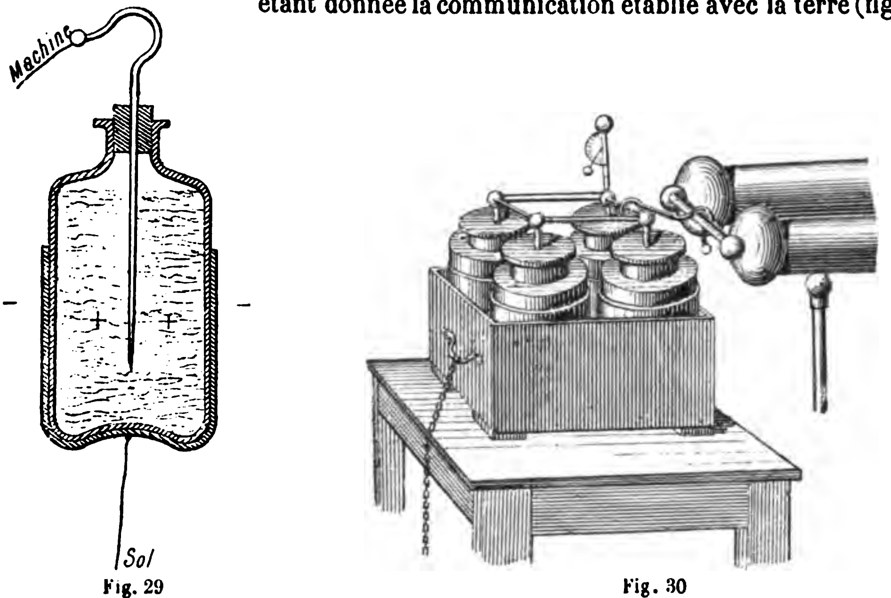


Fig. 29

Fig. 30

Si l'on dispose de plusieurs bouteilles de Leyde, il y a deux manières de les grouper : *en batterie* ou *en cascade* :

1° En batterie : on fait communiquer entre elles toutes les armatures intérieures

d'une part et toutes les armatures externes de l'autre, puis on met ces dernières en relation avec la terre, les autres étant réunies à la source électrique. On a alors un condensateur de grande capacité, car tout se passe comme si la bouteille était unique et de surface considérable (fig. 30);

2° En cascade : on suspend la première à la machine par son crochet et on relie le crochet d'une seconde bouteille à l'armature extérieure de la première. On continue ainsi la cascade en joignant au sol la dernière armature libre. La figure 31 indique suffisamment la disposition de l'électricité sur les diverses parties.

Le condensateur ainsi formé a une capacité inférieure à celle d'une bouteille seule. Le but de la cascade est de fractionner en quelque sorte le potentiel de la machine quand une bouteille est incapable de le supporter en entier.

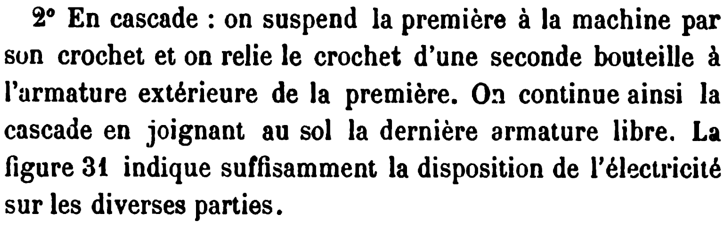


Fig. 31

Energie électrique. — Un corps chargé d'une certaine quantité d'électricité est doué d'énergie ; tel est le cas d'une machine électrique ou d'un condensateur chargé. Cette puissance a été acquise dans le cas d'une machine, aux dépens de l'énergie mécanique nécessaire à la rotation du plateau de verre ; elle est actuellement sous la forme électrique. Nous allons calculer sa grandeur en supposant une quantité d'électricité q à un potentiel V. Cette charge q a été amenée peu à peu sur le conducteur et au fur et à mesure de son arrivée, le potentiel a crû de 0 à V. Considérons le moment où le potentiel n'est encore que v ($v < V$). A partir de cet instant, amenons sur la machine ou dans le condensateur une très petite surcharge dq. Cela ne modifie pas sensiblement le potentiel, qui reste v. D'après la définition même du potentiel, le travail nécessaire pour porter la charge dq du niveau 0 au niveau actuel v a pour valeur :

$$v \times dq$$

Ce raisonnement est applicable à chaque instant et le travail total de la charge se compose d'une somme de termes tels que $v \times dq$ dans lesquels v varie en même temps que la charge acquise : $v = f(q)$. On peut donc se proposer de calculer cette somme ; elle a pour expression :

$$W = \int_0^q v \times dq$$

La sommation peut s'effectuer graphiquement. Construisons en effet la courbe OAB qui donne la variation du potentiel au fur et à mesure de la charge. Quand la quantité d'électricité est Om, le potentiel est Mm. Pendant l'apport de la masse mm', le potentiel varie infiniment peu (de Mm à M'm') et le travail dépensé est égal à l'aire du tra-

pèze **MM'** $m'm$. Il en est de même à chaque instant, de sorte que le travail total est représenté par l'aire comprise entre la courbe, l'axe des q et BB'. C'est l'énergie disponible ; elle ne dépend en rien du procédé de charge, car avec la même quantité q au même potentiel V, on peut toujours produire les mêmes effets.

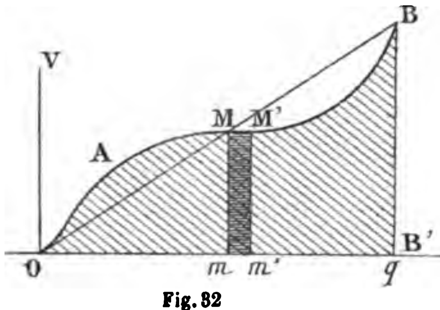


Fig. 32

Soit donc un mode de charge plus simple que les autres : on a fait croître le potentiel proportionnellement à la charge ; la courbe OAB devient une ligne droite OB et l'aire limitée s'exprime par :

$$(1) \qquad W = \frac{1}{2} V \times q$$

L'énergie d'un corps chargé d'une quantité q *d'électricité au potentiel* V *égale le demi-produit du potentiel par la masse électrique.*

Si les grandeurs V et q sont exprimées en unités absolues CGS, le produit est obtenu en *ergs.*

Dans le cas particulier d'un condensateur, on donne à cette énergie une autre expression : si on appelle C la capacité électrique, la charge q a pour valeur :

$$q = C \times V$$

d'où en portant dans W (1) :

$$(2) \qquad W = \frac{1}{2} C V^2$$

L'énergie d'un condensateur égale le demi-produit de sa capacité par le carré du potentiel de la machine.

Décharge d'un condensateur. — Il y a deux façons d'opérer : *instantanément* ou *lentement.*

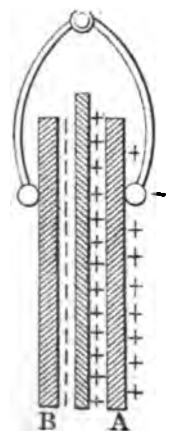


Fig. 33

1° La décharge est *instantanée* quand on touche l'une des armatures avec un conducteur et quand on approche ensuite l'autre extrémité du conducteur de la deuxième armature ; une étincelle jaillit : elle est due à la combinaison des deux électricités. On peut employer, à cet effet, un *excitateur* ou encore le corps humain en se servant des deux mains ; la décharge est accompagnée alors d'une commotion plus ou moins violente ;

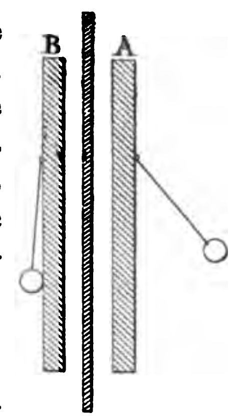


Fig. 34

2° Pour opérer par *décharges successives,* on met d'abord en communication avec le sol l'armature qui a été directement chargée en ayant soin de séparer l'autre de la terre. Le conducteur, mis ainsi au potentiel zéro, perd une cer-

taine charge d'électricité de façon que le plateau opposé présente un excès d'électrisation (deux pendules fixés aux armatures sont destinés à accuser ces excès).

On abandonne alors cette lame, on touche l'autre et ainsi de suite. On enlève chaque fois une fraction de la charge et on arrive, après un certain nombre de contacts, à une décharge à peu près totale.

Diverses expériences classiques, l'araignée de Franklin, le carillon électrique, etc., permettent de faire automatiquement cette décharge.

Charge résiduelle d'un condensateur. — L'électricité des armatures semble pénétrer peu à peu dans l'isolant.



Fig. 35

Si, en effet, on coupe la communication avec la source, on voit le potentiel de l'armature chargée baisser un peu ; d'un autre côté, après décharge brusque, l'électricité reparait. Ces faits s'expliquent par une pénétration progressive des charges dans le *diélectrique* et par un retour inverse quand le condensateur est déchargé.

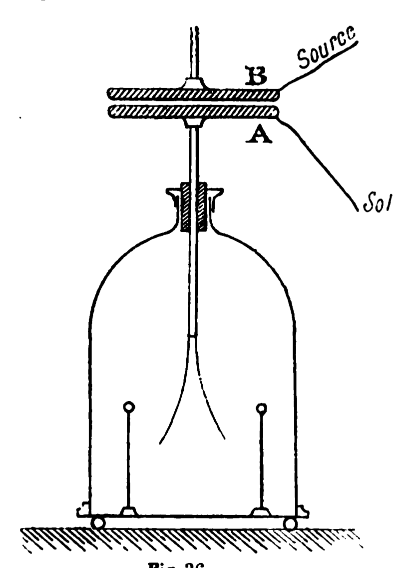


Fig. 36

On démontre cette propriété au moyen d'une bouteille de Leyde démontable (fig. 35). La lame de verre est un gobelet conique qui se sépare facilement des deux armatures. On charge d'abord la bouteille et on l'isole, puis, après quelque temps on désunit les diverses pièces. Les armatures sont neutralisées toutes deux et cependant si on reconstitue la bouteille, on peut obtenir une très forte étincelle.

Electroscope condensateur. — La boule de l'électroscope ordinaire a une faible capacité ; elle se charge donc faiblement si on la réunit à un corps de potentiel modéré. Dans le but d'augmenter cette charge, Volta a eu l'idée de munir l'appareil d'un condensateur ; cette pièce comprend deux disques en cuivre, l'un faisant corps avec la tige qui soutient les feuilles, l'autre tenu par un manche isolant (fig. 36). Le diélectrique est constitué par deux couches de vernis qui recouvrent les lames. On place la partie mobile sur le plateau fixe relié au sol, puis on met en communication le corps étudié et le disque supérieur. Par suite du phénomène de condensation, la lame A se

charge d'une façon contraire à celle du corps, soit négative pour fixer les idées, mais les feuilles ne divergent pas encore. Cela fait, on coupe la communication à la terre et on éloigne les deux armatures, l'électricité négative se répand dans les feuilles et les fait diverger. Pour déterminer le signe de l'électricité étudiée, on suit le procédé de l'électroscope ordinaire.

Cet appareil est surtout très utile pour l'étude des *sources* à très faible potentiel. Relié aux corps qui contiennent une quantité limitée d'électricité, il présente aussi l'avantage de soutirer une charge beaucoup plus forte que ne le ferait un électroscope à boule.

CHAPITRE VIII

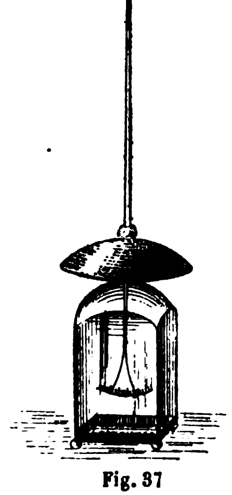
ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE

L'identité des orages et des phénomènes électriques que nous venons d'étudier a été établie par les expériences de Franklin, en Amérique, et de Dalibard, en France, vers la fin du siècle dernier. Tous deux avaient imaginé des conducteurs armés de pointes s'élevant très haut dans l'atmosphère, complètement isolés du sol, mais en communication avec des organes placés à la portée des observateurs.

Ils purent ainsi recueillir l'électricité de l'atmosphère et répéter avec elle toutes les expériences que l'on fait ordinairement avec les machines électriques.

L'atmosphère était donc, au moins pendant les temps orageux choisis, chargée d'électricité. Le sol a chance de présenter le même caractère. Nous allons donc examiner successivement l'électrisation de l'air et celle de la terre. On indiquera ensuite rapidement les phénomènes naturels qui en résultent, puis on verra comment on combat les effets désastreux de ces phénomènes.

Electricité de l'atmosphère. — Les expériences indiquées précédemment suffisent à établir l'électrisation de l'air, mais elles ne nous renseignent pas sur le potentiel en chaque point de la couche gazeuse. Pour arriver à cette connaissance du potentiel il faut relier le conducteur pointu à un appareil de mesure, un électromètre : on a ainsi le potentiel de l'atmosphère à l'extrémité de la pointe.


Fig. 37

Un simple électroscope réuni à la tige nous donne déjà le signe de l'électricité; cette détermination a été faite il y a longtemps déjà par de Saussure qui avait imaginé un électroscope, garanti contre l'action directe de l'atmosphère au moyen d'une cloche de cuivre formant écran, et muni d'une pointe assez élevée (fig. 37).

On comprend le rôle joué alors par la pointe; elle constitue une perte continue d'électricité si elle est chargée à plus fort potentiel que l'air, à l'extrémité; et l'équilibre n'a lieu sur les appareils en communication avec la tige qu'au moment où le potentiel de tous les conducteurs égale celui de l'air au point étudié.

On trouve ainsi que, par un temps serein, l'air est toujours chargé d'électricité positive.

Quant à la mesure du potentiel aux divers points, elle demande un peu de précautions : il faut une *pointe* au sens géométrique du mot; sinon elle ne remplit pas son rôle C'est pourquoi on la remplace ordinairement par un appareil à écoulement liquide : un flacon AB à tubulure latérale, reçoit dans cette tubulure, un tube coudé à l'extrémité et effilé. De l'eau remplit ce récipient et on relie ce fluide à l'électromètre comme la figure 38 l'indique, en ayant grand soin de bien isoler la bouteille. L'eau coule en très fines gouttelettes et chacune d'elles joue à son tour le rôle de la pointe déliée.

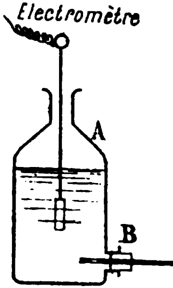


Fig. 38

Si on transporte le système à différentes hauteurs, on peut entrevoir la loi de variation du potentiel; il y a croissance à partir du sol et le plus souvent une augmentation rapide qui peut aller de 10 à 1000 volts par mètre à partir d'un sol horizontal.

On a cherché la forme des surfaces équipotentielles et on a trouvé qu'en plaine elles sont horizontales; les aspérités du terrain sont marquées par des saillies, et les creux, au contraire, par des dépressions. Mais ces dénivellations s'effacent peu à peu et finissent par disparaître à une certaine hauteur.

Electricité du sol. — L'électroscope de de Saussure permet d'en chercher le signe : il suffit de le placer sous un abri en communication avec la terre. Alors l'électricité du corps agit par influence sur la pointe de l'instrument et on trouve que le sol est électrisé *négativement.*

Mais cette constatation est inutile : en effet, le sol a un potentiel que nous prenons pour zéro et le potentiel croît à mesure qu'on s'élève dans l'air; c'est donc que le sol se comporte comme un corps chargé négativement et cette charge peut même s'évaluer d'après la variation du potentiel en fonction de l'altitude.

Remarquons cependant que le sol n'a pas en tous ses points exactement le même niveau électrique, et il en résulte des déplacements d'électricité d'un point à un autre. Ces phénomènes sont très nettement accusés par le téléphone qui parle spontanément, avec un bruit spécial, sous l'influence de ces courants dits *telluriques.*

Phénomènes des orages. — L'atmosphère tient en suspension des nuages qui peuvent être électrisés; les uns le sont positivement, les autres ont des charges négatives. Quant à ces différences d'état, elles sont probablement dues aux modes de formation même des nuages : certains formés dans l'air doivent être positifs, d'autres partis d'un point du sol sont négatifs.

Aussi nous avons en présence des corps chargés différemment, nuages et sol. Entre eux peuvent jaillir des étincelles comme nous en voyons entre deux conducteurs alimentés par nos machines. Cette décharge produit un phénomène lumineux appelé l'*éclair*; mais elle peut avoir lieu dans deux conditions différentes :

1° Deux nuages chargés d'une façon opposée peuvent être poussés par le vent l'un vers l'autre et alors l'éclair a lieu.

Ces deux nuages d'ailleurs n'ont pas besoin d'être l'un négatif, l'autre positif, car l'influence peut se manifester entre le premier, par exemple, fortement chargé et la région voisine du second.

Il est à remarquer d'ailleurs que ces deux nuages tendent à se rapprocher, en vertu de la loi de Coulomb, de manière à favoriser la production de l'étincelle ;

2° Le phénomène peut avoir lieu entre le sol et un nuage. C'est alors la *foudre*. Il n'y a pas que les nuages positifs qui puissent la provoquer, car une charge négative un peu forte agit par influence sur la terre et produit le même effet.

La foudre s'attaque de préférence aux points culminants, comme la théorie de la distribution électrique l'indique bien et elle choisit surtout les corps conducteurs, masses métalliques, arbres mouillés par la pluie, etc.

Les corps directement frappés sont souvent fortement endommagés : certains sont brisés, ou enflammés, ou fondus ou vitrifiés suivant les cas. Les êtres vivants n'échappent pas à cette loi générale ; la mort est instantanée.

On s'est demandé quel est le travail produit par une telle décharge. Différents expérimentateurs ont pu, d'après le poids d'un métal fondu par la foudre, calculer l'énergie dépensée : le chiffre de 7000 chevaux-vapeur agissant pendant une seconde entière a été donné par M. Siemens.

L'éclair est de forme variable; on le photographie assez couramment au moyen d'objectifs très rapides et on en établit diverses classes.

Sa durée a été évaluée; elle n'est qu'une toute petite fraction de seconde $\frac{1}{10000}$ peut-être.

Il existe certaines manifestations particulières des orages sur lesquelles nous devons insister : des êtres vivants, hommes ou animaux sont quelquefois victimes d'accidents, dans certains cas mortels, qui ne proviennent pas d'une décharge immédiate, mais de ce qu'on appelle le *choc en retour*; c'est bien en effet une commotion et elle est due ordinairement à une neutralisation brutale de l'électricité dans le corps en question. Supposons le cas particulier de l'influence d'un nuage; les deux électricités sont séparées dans le corps animé. Que la décharge ait lieu ensuite entre le nuage et un point quelconque, autre que le sujet qui nous occupe, la cause de l'influence cesse instantanément et la neutralisation en résulte aussitôt.

Paratonnerres. — Les pointes ont permis à Franklin et à Dalibard d'assimiler nos expériences d'électricité à celles qui ont pour siège l'atmosphère. Les mêmes corps peuvent nous préserver des effets de ces phénomènes naturels. C'est Franklin lui-même qui a montré cette application et imaginé les *paratonnerres* qui se composent d'une tige, de section suffisante, terminée en haut par une pointe, en cuivre ou en platine, placée à la partie supérieure des objets à préserver et reliée au sol par des corps bons conducteurs.



La théorie indiquée précédemment, à propos de la mesure du potentiel en un point de l'air, nous indique le rôle du paratonnerre : ce conducteur est d'une part en communication avec la terre, il ne peut donc être en état électrique d'équilibre que si la pointe touche une région atmosphérique au potentiel zéro. S'il n'en est pas ainsi, l'électricité passe continuellement du potentiel le plus élevé, c'est-à-dire de la pointe dans le sol. Cela nous rend compte du *rôle préventif* de l'instrument : les nuages électrisés se déchargent peu à peu par l'action de cette pointe.

Mais le paratonnerre joue un second rôle : si la foudre éclate malgré l'effet préventif indiqué, elle frappe la pointe de préférence aux corps voisins moins élevés : c'est là l'*action préservatrice*.

Ces deux effets exigent, pour se produire, une communication parfaite avec la terre; on y arrive en reliant la tige pointue au sol, au moyen d'une barre de fer de section assez grande. L'extrémité de ce conducteur doit d'ailleurs plonger dans une nappe d'eau qui ne tarisse jamais, et pour établir un contact suffisant, on emploie des plaques de large surface rattachées au conducteur.

Cette communication avec la terre est de la plus grande importance; si elle est mauvaise, le paratonnerre n'a plus aucune utilité; au contraire, il devient nuisible et très dangereux car des décharges se produisent entre la tige et les corps voisins reliés au sol.

On ne connaît pas au juste l'étendue de la zone de protection d'un paratonnerre; on admet souvent qu'elle forme autour du pied de l'instrument un cercle de rayon égal au double de la hauteur du paratonnerre mais aucun raisonnement ne justifie cette manière de voir. Si l'on veut rendre la protection absolument certaine, on peut faire usage d'un dispositif rappelant la cage de Faraday. On entoure tout l'édifice d'une sorte de réseau à mailles métalliques. Les parties saillantes sont reliées à ce réseau, les conduites d'eau et de gaz également; des communications bien établies avec le sol se trouvent de distance en distance. Dans ces conditions, même si la cage est fortement électrisée, il n'existe intérieurement aucune trace d'électricité.

Ce système particulier comprend ordinairement, au lieu du paratonnerre unique, des groupes de pointes disposés aux divers croisements des fils qui constituent la cage métallique. On a alors la disposition de Melsens dont la première application importante a été faite à l'Hotel de Ville de Bruxelles.



DEUXIÈME PARTIE

MAGNÉTISME

CHAPITRE PREMIER

PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX

Définitions. — Certains minerais de fer ont la propriété d'attirer le fer et quelques autres métaux. On appelle *aimants* tous les corps qui possèdent le même caractère que ces minerais.

Les *corps magnétiques* sont ceux que l'aimant peut attirer; ils comprennent surtout le fer et, à un degré moindre, le nickel, le cobalt.

Aimants naturels et artificiels. — On distingue deux sortes d'aimants : 1° les *aimants naturels* ou *pierres d'aimant*: c'est l'oxyde de fer Fe^3O^4 dit *oxyde magnétique* très abondant en Suède et en Norvège;

2° Les *aimants artificiels*; ce sont des pièces d'acier qui ont acquis leur faculté par simple frottement de la pierre d'aimant à leur surface.

Les aimants naturels ont des formes très variées; on peut les tailler en prismes rectangulaires et on les munit, comme l'indique la figure 39, de garnitures de fer destinées à servir d'intermédiaires dans l'attraction ou dans la suspension des objets magnétiques.

Fig. 39.

Les aimants artificiels sont plus commodes; on peut leur donner toutes sortes de formes : barreaux, aiguilles, fers à cheval, etc.

Régions polaires des aimants. — Le fer est attiré par l'aimant; tel est le fait fondamental du magnétisme; mais nous pouvons nous demander d'où émane cette action. Pour cela plongeons un barreau aimanté dans de la limaille de fer bien fine, nous voyons alors cette matière se fixer autour de l'aimant, mais pas également par tout; elle forme, vers les extrémités du prisme, deux houppes volumineuses tandis que la région intermédiaire est à peu près dépourvue de cette limaille. Il faut donc conclure de cette expérience que là force attractive d'un aimant émane surtout des deux extrémités que l'on peut appeler *régions polaires*.

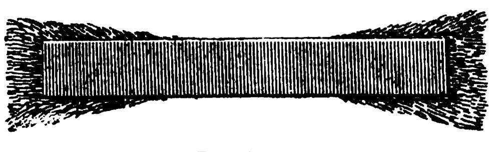


Fig. 40

Les deux régions sont de nature différente. — Imaginons un aimant suspendu librement; nous pouvons réaliser cette disposition au moyen d'une aiguille légère en forme de losange soit tenue par un fil (fig. 41), soit placée sur pivot vertical (fig. 42) ou encore avec un barreau placé sur un bouchon qui flotte sur l'eau (fig. 43). Dans tous les cas nous voyons l'aimant s'orienter de lui-même et tourner l'une de ses extrémités, toujours la même, à peu près vers le nord. Vient-on à déranger ce barreau, on le voit revenir à sa position première et il en est d'ailleurs de même si l'on renverse complètement l'aimant; non seulement la terre l'oriente, mais en outre la position d'équilibre est unique : l'une des extrémités se tourne vers le nord, l'autre prend la direction du sud. Il est donc évident que les deux extrémités ne sont pas semblables; on les distingue l'une de l'autre par les noms de *Nord* et de *Sud*. Dans les aimants disposés en aiguilles, on a l'habitude de laisser sur la moitié Nord la couleur bleue qui est due au recuit de l'acier. De cette façon, on reconnaît à première vue les deux extrémités de l'aimant.

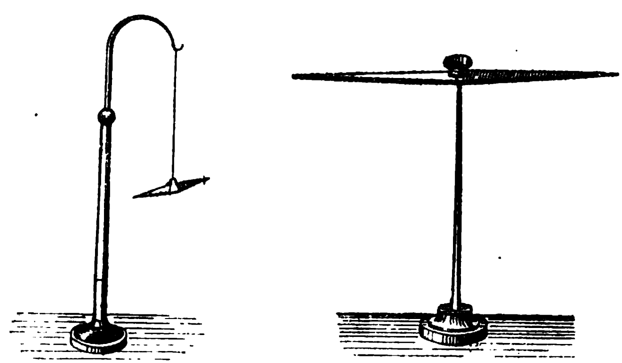


Fig. 41

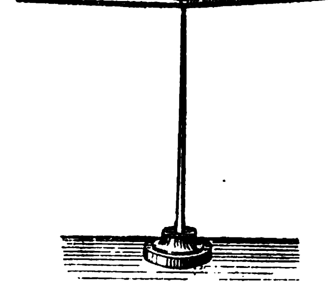


Fig. 42

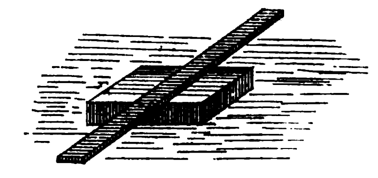


Fig. 43

Actions réciproques des aimants. — Soit une aiguille aimantée mobile sur un pivot vertical. Elle se tient sensiblement suivant la direction nord-sud; mais si nous approchons de l'une des extrémités une autre aiguille semblable à la première, nous observons des mouvements, attraction ou répulsion. Si les deux régions présentées l'une à l'autre sont de même nature, c'est-à-dire toutes les deux Nord (fig. 44) ou toutes

les deux Sud, l'action est répulsive; elle consiste, au contraire, en une attraction quand nous mettons en regard deux extrémités de noms contraires.

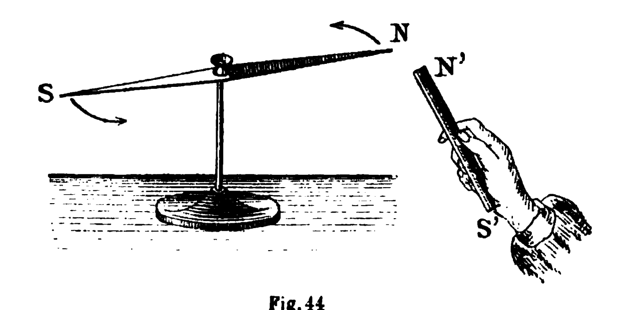


Fig. 44

Nous pouvons donc énoncer les deux lois suivantes, analogues à celles de l'électricité :

1° *Deux régions de même nom se repoussent;*

2° *Deux extrémités de noms contraires s'attirent.*

Pôles d'un aimant. — Nous savons que les deux extrémites d'un barreau aimanté sont de nature différente. On dit qu'il y a deux espèces de magnétisme, de même qu'il existe deux sortes d'électricité : le *magnétisme Nord*, dans la partie qui se dirige vers le nord géographique et le *magnétisme Sud* dans la région opposée. Le siège de ces deux magnétismes est surtout l'extrémité de chaque région, comme nous l'avons constaté en plongeant le barreau dans la limaille; mais nous pouvons demander à une expérience un peu plus soignée, le mode de distribution du magnétisme :

On met une feuille de papier fort au-dessus d'un barreau prismatique aimanté AB et on la saupoudre de limaille fine. En imprimant de légères secousses au carton, on voit les grains s'orienter en courbes régulières, comme la figure 45 le représente; ces lignes partent d'un point à droite de l'aimant, par exemple, pour aboutir à un autre point symétrique du premier, à gauche. Elles sont d'autant plus serrées qu'on approche davantage des bouts du barreau, mais elles existent cependant (en petit nombre), dans la région moyenne. Cela nous indique la présence du magnétisme dans toute une portion assez étendue de l'aimant.

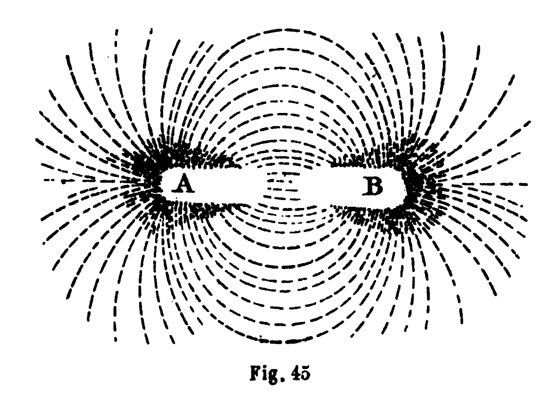


Fig. 45

Aussi l'action directrice de la terre doit s'exercer sur tous les éléments du magnétisme mis en évidence par cette expérience du *spectre magnétique*. Sur chacun agit une force, et toutes ces forces, relatives à une même moitié du barreau, sont parallèles entre elles et de même sens. Elles admettent donc, comme la Mécanique nous

l'enseigne, une résultante parallèle à leur direction et égale à leur somme. Cette résultante est parfaitement déterminée; elle s'applique en un point également bien fixe que l'on appelle *pôle de l'aimant*. Il y en a deux semblables, un vers chaque extrémité et ils portent les noms respectifs de *pôle Nord* et de *pôle Sud*. Cette notion de pôle acquise, on voit que l'aimant peut se représenter par deux masses de magnétisme Nord et Sud concentrées en deux points situés vers les extrémités de l'aimant. L'action terrestre se compose alors de deux forces appliquées en ces deux points, l'une tire vers le nord, le pôle Nord, l'autre vers le sud, le deuxième pôle.

Quand deux aimants sont en présence, les deux pôles de chacun d'eux peuvent remplacer les barreaux de sorte que les actions, au lieu d'émaner de tous les points de l'un des aimants, semblent provenir seulement des pôles; de même elles se dirigent vers les pôles du second.

Axe magnétique des aimants. — Soit un aimant quelconque; abandonnons-le à l'action de la terre; deux forces dirigées vers le nord l'une, et l'autre vers le sud, agissent respectivement sur ses pôles; ces deux actions sont parallèles et elles ont pour effet de faire tourner l'aiguille jusqu'au moment où les deux forces sont dans le prolongement l'une de l'autre. La droite NS qui joint les pôles s'oriente donc du nord au sud; cette ligne, qui prend une direction invariable dans l'aimant en équilibre, est appelée l'*axe magnétique* du barreau.

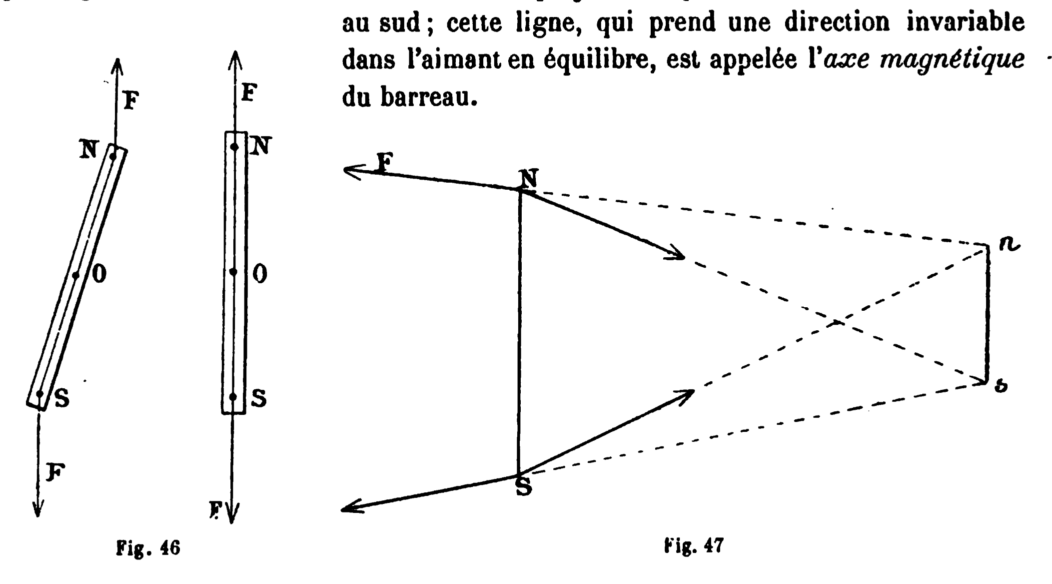


Fig. 46

Fig. 47

Lois numériques des actions magnétiques. — Mettons deux aimants en présence et considérons uniquement l'action de *ns* supposé fixe sur NS mobile : quatre forces s'appliquent à NS (fig. 47) ;

Le pôle N est en effet attiré vers *s* et repoussé par *n*.

Le pôle S est attiré vers *n* et repoussé par *s*.

Mais ces forces diminuent, comme nous allons le voir et comme on le prévoit bien, quand la distance devient considérable. On peut donc, en prenant des aimants de grande

longueur mis assez près l'un de l'autre, ne considérer sur le pôle N que l'action répulsive de n et sur S que la répulsion de s.

Dans ces conditions le pôle N n'est soumis qu'à une seule force F, très sensiblement, et nous pouvons chercher la grandeur de cette action unique. Elle doit évidemment dépendre de deux choses :

1° Du degré d'aimantation des deux barreaux ;

2° De la distance qui sépare les pôles.

1° *Degré d'aimantation.* — Ne connaissant pas la nature du magnétisme, nous opérerons comme en électricité : supposons deux pôles N et n de même nom ; ils se repoussent mutuellement avec une intensité F mesurable. Enlevons le pôle N et remplaçons-le par un autre de même nom N' ; l'action ne change pas de sens, mais sa grandeur varie en général. Si elle restait par hasard la même que dans le premier cas,

F N r n F

F' N' r n F'

Fig. 48

nous dirions que N et N' sont identiques ; autrement dit ils auraient la même quantité de magnétisme. Mais si la nouvelle force F' devient double de F, nous considérons le pôle N' comme deux fois plus chargé de magnétisme que N et ainsi de suite. D'après cela, toutes choses égales d'ailleurs, nous voyons que l'action des deux pôles est proportionnelle à la quantité variable de magnétisme du pôle N. Mais nous pouvons poursuivre notre raisonnement : sans changer N, modifions n et faisons la même convention pour mesurer le degré d'aimantation de ce pôle variable : l'action mutuelle est proportionnelle à la charge magnétique de n, de sorte qu'en résumé, *découle de notre convention* une loi :

L'action mutuelle de deux pôles est proportionnelle au produit des quantités de magnétisme de chacun d'eux.

2° *Distance.* — La balance de Coulomb, convenablement modifiée permet de chercher la relation de la force et de la distance ; l'aiguille de gomme laque est remplacée par un aimant long et léger et le trou pratiqué excentriquement dans le couvercle, livre passage à un autre barreau très long dont l'extrémité est amenée dans le plan horizontal de l'aiguille mobile. Les deux pôles mis en regard sont de même nom ; ils se repoussent et on peut, par une torsion convenable du fil de suspension, maintenir l'équilibre dans les diverses positions, c'est-à-dire à des distances variables : la torsion imprimée mesure alors la force répulsive et l'on trouve ainsi cette seconde loi :

L'action mutuelle de deux pôles d'aimant est en raison inverse du carré de leur distance,

Nous résumerons ces deux lois par une formule ; appelons m et m' les *masses ma-*

gnétiques ou quantités de magnétisme des deux pôles, r leur distance et f l'action, nous avons :

$$f = K . \frac{m m'}{r^2},$$

où K est une quantité constante.

Ordinairement, on affecte *par convention* les quantités de magnétisme d'un signe : le signe + est choisi pour le pôle Nord, et — pour le pôle Sud. On voit donc, d'après cela, que :

1° f est positif quand m et m' sont tous deux positifs ou tous deux négatifs, c'est-à-dire quand les deux pôles sont de même nom. Alors ils se repoussent de sorte que la répulsion est accusée par le signe + de la force.

2° f est négatif quand m et m' sont de signe contraire. Alors les deux pôles ont des noms opposés et la force est attractive. Une attraction correspond donc à $f < 0$.

Champ magnétique. — Supposons un aimant ou plus généralement un système d'aimants. Nous pouvons présenter à ce barreau, ou à cet ensemble, de la limaille de fer très légère placée en diverses positions : si l'on est au voisinage des corps agissants, l'attraction est vivement manifestée, plus loin elle est moins forte et s'affaiblit de plus en plus à mesure qu'on s'éloigne. A un moment donné l'action cesse d'être sensible. Nous pouvons faire cet essai dans toutes les directions et délimiter ainsi la région de l'espace dans laquelle se fait sentir l'attraction. Cette portion est ce qu'on appelle le *champ magnétique* du système d'aimants. Pour la limiter nous avons fait usage d'un procédé assez peu sensible ; une aiguille très mobile nous donnerait, au point de vue pratique, des renseignements plus précis, mais nous pouvons comprendre par l'un et par l'autre procédé ce que l'on doit entendre par champ magnétique : c'est la région dans laquelle se fait sentir l'action des aimants.

Pour définir la *valeur du champ* en chaque endroit, nous opérerons à peu près comme en électricité : nous mettrons en chaque point un pôle Nord contenant l'unité de masse magnétique et nous chercherons la grandeur de l'action qui s'exerce sur ce pôle : c'est là l'*intensité du champ* en ce point, ou encore la *force magnétique* due au champ. Ordinairement cette force varie de direction et de grandeur quand on passe d'un point à un autre ; mais il peut arriver aussi que ces deux facteurs se maintiennent invariables ; le champ est dit alors *uniforme*. Tel est, par exemple, le champ de la terre qui agit sur nos aiguilles mobiles ; si on le considère dans une région peu étendue, il est caractérisé par une direction et une intensité constantes.

Lignes de force. — Comme en électricité, on considère les *lignes de force* magnétiques : ce sont des lignes qui donnent en chaque point, par leur tangente, la *direction du champ*. Si la force conserve une orientation constante, les lignes de force sont des droites parallèles ; sinon elles sont quelconques. On a même



dans l'étude du magnétisme, l'avantage de pouvoir réaliser pratiquement ces lignes ; en effet, la limaille de fer, projetée sur un papier dans le champ se dispose suivant la force magnétique en vertu d'un phénomène que nous étudierons sous le nom d'influence. On peut dès lors étudier le champ par l'expérience du spectre ; soit, par exemple, le cas de deux aimants prismatiques posés dans le prolongement l'un de l'autre et à une petite distance, leurs pôles contraires en regard. Les files de limaille se disposent comme ci-contre : dans la partie axiale des aimants, elles sont serrées et presque parallèles : là le champ est à peu près uniforme, mais si l'on s'écarte de cette région, les divergences des lignes nous indiquent une dissymétrie du champ magnétique

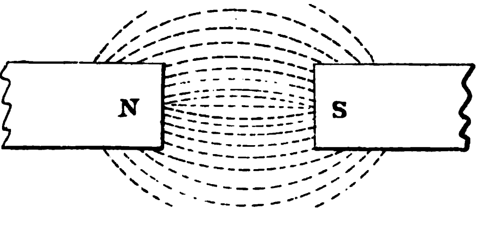


Fig. 49

Les lignes de force ont un *sens*. En effet, la *force* est toujours supposée agissant sur un pôle Nord (de grandeur unité). Ce pôle en tant que Nord est *repoussé* par le pôle Nord de l'aimant ; la ligne de force s'écarte donc de ce dernier ; son sens est de *Nord à Sud.*

Lignes d'induction. — On admet que les lignes de force, réunissant les deux pôles extérieurement, ne sont que la continuation de lignes intérieures dites *lignes d'induction.*

Ces deux sortes de lignes se continuent mutuellement et le sens des lignes d'induction est du *pôle Sud au pôle Nord.*

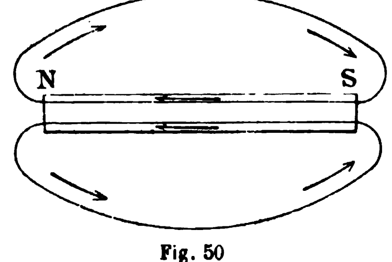


Fig. 50

Nous avons ici quelque chose d'analogue à ce qui a lieu en électricité (voir plus loin) et on peut dire qu'il se propage dans l'intérieur de l'aimant une sorte de courant ou *flux d'induction.* Ce flux s'évalue aisément comme nous le verrons plus tard. Au lieu de le considérer tout entier, on le rapporte souvent à une section unité du barreau. On a alors l'*induction magnétique*, grandeur qui se représente ordinairement par $\mathcal{B}$. Si nous désignons le flux par $\mathcal{N}$ et la section par S, nous avons.

$$\mathcal{B} = \frac{\mathcal{N}}{S}$$

Valeur des deux quantités de magnétisme d'un aimant. — L'action de la terre sur une aiguille aimantée mobile est purement *directrice* ; on ne constate, dans le cas de la suspension par un fil, aucune translation. Donc les forces agissant sur les pôles sont égales entre elles. Cela nous conduit à une conséquence : le champ étant uniforme et l'action étant la même, en grandeur sur les deux pôles, c'est que les deux charges Nord et Sud sont de même valeur.

Ainsi les deux quantités de magnétisme d'un aimant sont égales entre elles. Puisque nous affectons les grandeurs de signes, l'une est $+m$, l'autre $-m$.

Définitions. — Soit m la valeur absolue des pôles ; si les deux sont distants de l, on appelle *moment magnétique* du barreau, le produit :

$$\mathfrak{M} = m \times l$$

On voit facilement la signification de cette quantité ; supposons le barreau placé dans un champ uniforme d'intensité unité ; la force qui s'exerce sur N et sur S a pour valeur m, et quand l'aimant est à 90° de sa position d'équilibre, le moment du couple des forces agissant en N et en S a pour valeur le produit de la force m par le bras de levier l, soit ml ou $\mathfrak{M}$ (fig. 52).

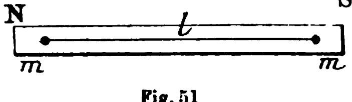


Fig. 51

Considérons un barreau allongé ; on rapporte souvent son moment magnétique à l'unité de volume et on appelle ce quotient *intensité d'aimantation* $\mathfrak{I}$:

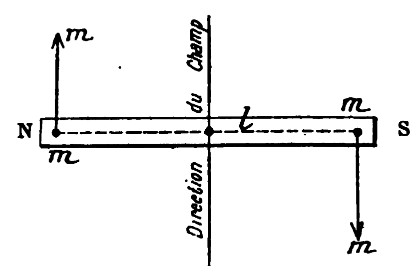


Fig. 52

$$\mathfrak{I} = \frac{\mathfrak{M}}{V}$$

Mais on a :

$$V = S \times l$$

S étant la section, parce que les pôles sont voisins des extrémités, donc il vient :

$$\mathfrak{I} = \frac{\mathfrak{M}}{V} = \frac{ml}{Sl} = \frac{m}{S}$$

Ainsi l'intensité d'aimantation est encore la quantité de magnétisme qui recouvre l'unité de section du barreau (si on admet que la répartition de la quantité m au pôle est uniforme sur toute la section).

Rupture d'un aimant. — Prenons un barreau allongé ; ses deux pôles sont

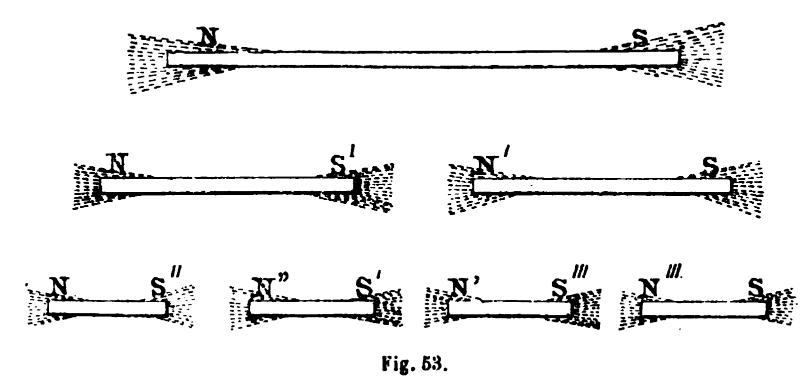


Fig. 53.

assez nettement mis en évidence par la disposition de la limaille. Brisons-le en deux parties et plongeons chacune d'elles dans la limaille ; nous observons deux pôles dans

chaque segment : chacun devient donc un aimant complet ; nous pouvons fractionner les deux moitiés et nous voyons les mêmes phénomènes continuer à se produire, ce qui montre qu'on ne peut pas isoler un pôle d'aimant. Toujours, quoi qu'on fasse, c'est un aimant complet, avec ses deux pôles, que l'on obtient.

Il s'agit d'étudier ces faits de plus près et de voir comment se disposent les nouveaux pôles : les anciens N et S ne changent pas de place, mais en chaque point de rupture apparaissent deux extrémités de noms opposés et capables de former des aimants entiers avec les pôles qui existent déjà.

Si l'on réunit tous les morceaux dans leur ordre primitif, on reforme l'aimant initial et tous les pôles intermédiaires disparaissent.

En utilisant la notion des lignes d'induction, nous disons que la rupture de l'aimant a pour résultat de fractionner ces lignes ; les fragments obtenus tendent à se réunir extérieurement par des lignes de force, de sorte que chaque partie se comporte comme un véritable aimant.

Constitution des aimants.— Les faits précédents s'expliquent au moyen de l'hypothèse de Weber : chaque molécule du corps magnétique serait un petit aimant possédant ses deux pôles. Si le corps magnétique est aimanté, toutes ses molécules sont orientées d'une même manière de telle sorte que tous les pôles Nord soient par exemple à gauche et tous les petits pôles Sud à droite. Il en résulte qu'une file rectiligne de



Fig. 54.

molécules se comporte comme un aimant allongé ayant deux pôles seulement à ses deux extrémités, puisque deux pôles en contact (de nom contraire) se neutralisent mutuellement. Il en est évidemment de même pour un barreau NS (fig. 54) formé d'un grand nombre de files juxtaposées ; cette barre n'a de pôles qu'en ses deux extrémités mais si on vient à la rompre en un point quelconque, on met en liberté et en évidence les deux pôles opposés qui s'annulaient en cet endroit.

CHAPITRE II

INFLUENCE MAGNÉTIQUE

Phénomène fondamental. — Suspendons un barreau de fer doux au-dessus d'un plateau contenant de la limaille et approchons ensuite un aimant AB de la partie supérieure du morceau de fer. Immédiatement la limaille se soulève et vient adhérer au fer, montrant ainsi l'*aimantation* de ce métal. Il s'agit de trouver la répartition des pôles qui ont pris naissance : pour cela une aiguille mobile est approchée de a ; elle nous accuse, par ses mouvements, un pôle identique à A, ce qui prouve que b est l'opposé de A. Nous pouvons donc résumer ce phénomène de l'*influence magnétique* par cet énoncé :

Au contact d'un aimant, un morceau de fer doux s'aimante et les deux pôles en regard sont de nom contraire.

Fig. 55

On peut varier l'expérience : au lieu d'employer la limaille pour constater l'aimantation, présentons un morceau de fer au prisme ab ; nous le voyons soutenu lui-même et capable à son tour d'agir sur la limaille ; il s'est donc aimanté et peut aussi communiquer la même propriété à un troisième barreau que l'on met au-dessous de lui. On forme ainsi, si l'on veut, toute une chaine ; il suffit de choisir les fragments de plus en plus petits.

Fig. 56

C'est d'ailleurs là un fait identique à celui de l'attraction de la limaille : chacun des grains s'aimante et communique la faculté d'aimantation au grain voisin pour former des files continues.

Tel est le fait fondamental.

Nous avons supposé qu'on opérait sur du fer bien doux et nous allons voir ce qui arrive quand la cause magnétisante cesse.

A un moment donné, retirons l'aimant permanent : *immédiatement* les morceaux de fer suspendus retombent, la limaille se détache et l'aiguille aimantée cesse d'accuser un pôle en bas du barreau suspendu. Donc la désaimantation est instantanée, dans le cas du fer doux.

Le phénomène de l'influence est plus général que nous ne l'avons supposé ; il suffit de placer le métal magnétique dans un champ pour lui communiquer l'aimantation. Ainsi, la limaille, pour être soulevée, n'a pas besoin d'avoir un contact immédiat avec l'aimant : une feuille de papier, du carton, une planche de bois, une couche d'air peuvent être interposés.

Susceptibilité magnétique. — L'aimantation du métal magnétique placé dans le champ dépend de l'intensité de ce champ. Appelons $\mathcal{H}$ cette intensité, ce qu'on appelle encore, dans le cas actuel, la *force magnétisante*. Plus $\mathcal{H}$ est grand plus l'intensité d'aimantation $\mathfrak{J}$ est considérable quand nous mettons un prisme de fer très allongé dans le champ magnétique. Nous pouvons écrire :

$$\mathfrak{J} = K\mathcal{H}$$

K est alors le rapport $\frac{\mathfrak{J}}{\mathcal{H}}$ de l'intensité d'aimantation à la force magnétisante ; on le désigne sous le nom de *coefficient d'aimantation* ; il caractérise la *susceptibilité magnétique* du métal.

Malheureusement ce quotient n'est pas constant pour un corps donné ; pour de petites forces magnétisantes, il va en augmentant en même temps que ces forces, mais cet effet ne dure pas ; le coefficient diminue ensuite rapidement quand on accroît la valeur de $\mathcal{H}$. Il résulte de là cette propriété que l'intensité d'aimantation croît suivant les ordonnées de la courbe ci-contre, les abscisses représentant les forces magnétisantes $\mathcal{H}$. Cette courbe tourne d'abord sa cavité vers l'axe des $\mathfrak{J}$ (K va en croissant) puis elle possède un point d'inflexion à partir duquel K décroît. Cette décroissance est ensuite tellement rapide que l'aimantation n'augmente plus si on force $\mathcal{H}$: on a atteint alors un degré d'aimantation maximum appelé ordinairement la *saturation magnétique*.

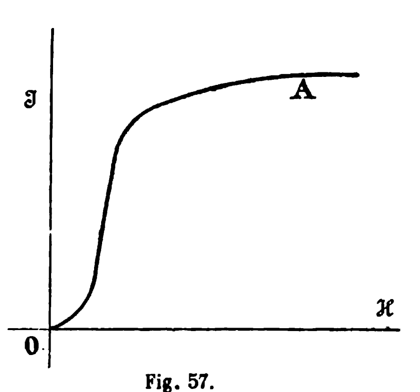


Fig. 57.

Pour résoudre numériquement le problème de l'aimantation par influence, il faut connaître cette courbe relative à chaque métal en particulier. On a soin d'exprimer $\mathcal{H}$ en unités CGS, c'est-à-dire la force en dynes agissant sur le pôle unité ; de même $\mathfrak{J}$ se donne par le moment rapporté au centimètre cube du barreau.

Perméabilité magnétique. — L'interposition du fer dans le champ modifie profondément ce champ ; supposons-le uniforme au début, caractérisé alors, comme nous le savons, par des lignes de forces parallèles entre elles. Plaçons-y le morceau de fer et répétons ensuite l'expérience du spectre magnétique : dans le voisinage du métal apporté, les lignes de force se resserrent de manière à passer en grand nombre dans cette matière qui semble produire une aspiration de ces lignes ; le flux d'induction y

devient considérable. On exprime le fait en disant que les corps magnétiques sont perméables aux lignes de force et on appelle *perméabilité* la propriété elle-même.

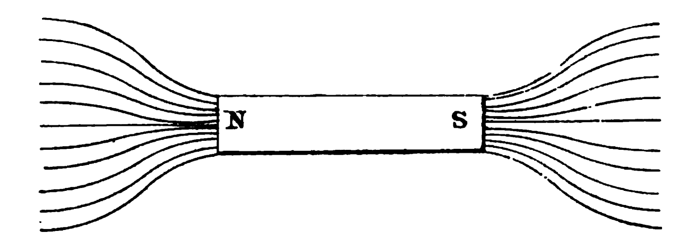


Fig. 58

Appelons $\mathcal{H}$ la *foree magnétisante*. Il est possible, dans certains cas, d'évaluer le flux ou l'*induction* $\mathcal{B}$ après l'interposition du corps perméable ; et alors :

$$\mathcal{B} = \mu . \mathcal{H}.$$

μ est le rapport $\frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}$ de l'induction magnétique à la force magnétisante ; il se nomme *coefficient de perméabilité* du métal. Ce quotient n'est pas constant, et ses variations sont analogues à celles de K pour une même substance donnée.

Comme indication générale, nous pouvons dire que le fer doux est le métal magnétique le plus perméable ; puis viennent les aciers doux, les fontes, les aciers trempants et enfin les ferro-manganèses qui, avec 12 % de manganèse perdent toute propriété magnétique.

Magnétisme rémanent. — Nous avons supposé du fer parfaitement doux, c'est-à-dire pur chauffé au rouge et refroidi ensuite lentement. Alors seulement le magnétisme acquis par influence se perd de suite quand l'action magnétisante cesse. Mais il n'en est pas toujours de même. Pour peu que le métal ait été travaillé ou qu'il soit impur, il conserve, après la destruction du champ, une certaine aimantation ; c'est le *magnétisme rémanent*.

Les divers corps magnétiques ont été étudiés à ce point de vue nouveau ; l'acier trempé tient la tête, il conserve jusqu'à la moitié du magnétisme total développé par influence.

Force coercitive. — Hystérésis. — On a mis pendant longtemps cette difficulté de la désaimantation sur le compte d'une résistance particulière que l'on appelait *force coercitive*. Aujourd'hui ce mot prend une signification plus précise : le magnétisme subsiste partiellement après la disparition de la cause, mais on peut l'annuler au moyen d'un champ opposé au premier. La force magnétisante nécessaire à cette désaimantation complète donne la valeur de la force coercitive.

Dans les fers ordinaires, cette valeur est faible ; pour la fonte elle est cinq fois plus grande ; pour l'acier au chrome trempé, elle vaut 15 fois celle du fer, et enfin le rapport devient 20 quand on considère l'acier à 3 % de tungstène.

Si l'on soumet le métal magnétique à des forces magnétisantes variables, on constate une généralisation du phénomène du magnétisme rémanent : il y a retard de l'aimantation et de la désaimantation sur les causes magnétisantes ou démagnétisantes ; on a là les phénomènes désignés sous le nom d'*hystérésis*. Ils ont pour effet de produire une consommation inutile d'énergie et ce travail se transforme en chaleur. Nous aurons à revenir plus tard sur ces faits quand nous étudierons les relations des courants électriques et des aimants.

Explication de l'influence magnétique. — Nous avons vu (page 45) l'hypothèse de Weber.

Les éléments existent aussi bien dans les corps magnétiques non aimantés que dans les aimants mais l'orientation y fait défaut si bien que l'action résultante est nulle sur un autre corps magnétique.

L'influence d'un champ a alors simplement pour effet de disposer régulièrement tous les éléments : les pôles Nord sont tournés du même côté ; les pôles Sud prennent la direction opposée de sorte que l'aimantation en résulte (fig. 54).

Mais il existe une sorte de difficulté au déplacement : un champ faible ne parvient pas à la vaincre complètement et l'orientation n'est pas complète. Dès que le champ a atteint une certaine valeur, l'orientation se parfait, et l'on obtient alors la *saturation magnétique*.

Les agitations mécaniques influent sur ces phénomènes, elles favorisent l'aimantation mais elles ont aussi pour résultat de provoquer le retour à l'état initial, c'est-à-dire la désaimantation quand le champ magnétique a été supprimé.

CHAPITRE III

AIMANTS PERMANENTS

Nature des aimants. — Il faut au métal magnétique destiné à former un aimant permanent une grande force coercitive. L'acier se trouve donc tout indiqué pour cet emploi, mais les différentes variétés de ce métal sont plus ou moins avantageuses. On a reconnu que les chocs, la torsion, l'écrouissage ont une influence marquée sur l'aimantation, mais le facteur le plus important est la trempe. Plus elle est dure, plus l'aimant est puissant en général. Le recuit, au contraire, diminue cette propriété et d'autant plus qu'il a porté le métal à une température plus élevée.

Parmi les aciers capables de prendre une trempe très dure, il faut citer en première ligne la variété au tungstène, à 3 %, que l'on emploie à peu près toujours pour la confection des aimants.

Forme des aimants. — Suivant les cas, on adopte des formes variées. Les deux principales sont celles de barreaux et d'aimants repliés ou courbés, en fer à cheval, par exemple. Entre ces deux formes existe une différence essentielle. En effet, l'aimant rectiligne nous présente, dans l'expérience du spectre magnétique, des *lignes de force* dont la configuration nous est connue ; mais il est bien certain que ces lignes de force n'existent pas seulement *en dehors* du barreau ; un certain nombre d'entre elles doit suivre le métal lui-même et se diriger du *pôle Nord au pôle Sud*. Il y a alors à l'intérieur, en plus du flux d'induction (de S à N), un autre flux (portion du *flux de force*) qui est en opposition avec le premier ; il constitue ce qu'on appelle le *flux de force démagnétisant*.

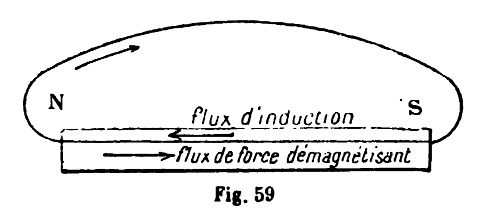


Fig. 59

Cela posé, supposons que l'on recourbe le barreau sur lui-même ; les lignes de force présentent alors un trajet réduit par le fait du rapprochement des pôles, tandis que le chemin à parcourir par le flux démagnétisant conserve sa valeur.

Le flux de force doit donc de plus en plus abandonner son trajet intérieur à mesure que les extrémités de l'aimant deviennent plus voisines. A la limite, quand elles se rejoignent, il ne reste plus de lignes de force visibles, mais uniquement des lignes d'induction fermées sur elles-mêmes et l'effet démagnétisant doit être supprimé.

On arrive d'ailleurs sensiblement au même résultat si on allonge suffisamment le barreau aimanté.

Dans tous les cas le métal trempé manque d'homogénéité car le changement moléculaire a porté surtout sur les parties superficielles; il résulte de cette considération que le siège principal du magnétisme est cette couche extérieure; l'expérience d'ailleurs justifie pleinement cette manière de voir, car la dissolution ou le meulage enlèvent les parties actives. Dès lors nous aurons intérêt à diviser les barreaux en *feuillets* minces que l'on aimantera séparément et que l'on réunira ensuite en *faisceau*. L'intensité d'aimantation (moment magnétique par unité de volume) se trouve ainsi considérablement augmentée.

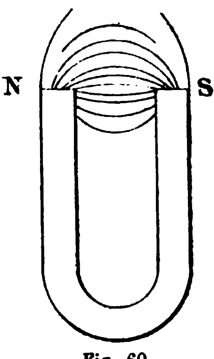


Fig. 60

Influence de la chaleur. — L'aimantation d'un barreau d'acier diminue quand on élève la température, mais cet effet n'est pas complètement définitif : une partie du magnétisme, qui semble chassée par l'échauffement, revient quand la température baisse. Cependant un barreau porté au rouge vif risque de perdre absolument son aimantation.

Une application méthodique de la chaleur peut avoir un effet avantageux; que l'on maintienne assez longtemps l'aimant à 100° et que l'on réaimante ensuite à saturation, on aura, en faisant suivre encore cette opération d'un nouveau recuit, une constance à peu près absolue de l'intensité d'aimantation.

Procédés d'aimantation. — Il s'agit de placer le barreau magnétique dans un champ et de vaincre la résistance que présentent au déplacement tous les aimants élémentaires qui préexistent dans le métal. Les méthodes aujourd'hui employées sont toujours ou à peu près des procédés électriques; nous y reviendrons plus tard mais on peut, dans certains cas spéciaux, et notamment dans celui des aiguilles, faire usage de frottements méthodiques du morceau d'acier contre les aimants permanents ou réciproquement.

Les procédés se ramènent à trois : la simple touche, la double touche unie et la double touche séparée.

1° *La simple touche* consiste à frotter l'aimant sur le morceau d'acier, les deux parties étant rectangulaires; on a soin de partir d'une extrémité du barreau et on le parcourt en entier; cela fait, l'aimant est soulevé et reporté à son point de départ; on recommence alors l'opération; le pôle frottant développe au dernier point touché un pôle contraire à lui-même;

2° *Double touche unie.* — Le barreau d'acier appuie sur les pôles opposés de deux aimants ns et $n's'$. Au milieu de cette pièce est posé un ensemble de deux aimants NS, N'S' inclinés, réunis par leurs pôles contraires placés d'ailleurs comme $n\ s'$. Le tout est déplacé vers la droite, par exemple jusqu'en S_1 puis ramené toujours par glissement

jusqu'à l'extrémité opposée N_1 et ainsi de suite, de façon à parcourir les deux moitiés du barreau un nombre égal de fois. Les deux aimants situés du même côté concourent à donner l'aimantation au barreau : le pôle qui en résulte est inverse de ceux des aimants; N_1 est du côté de S' et de s' ; S_1 est donné par N et n;

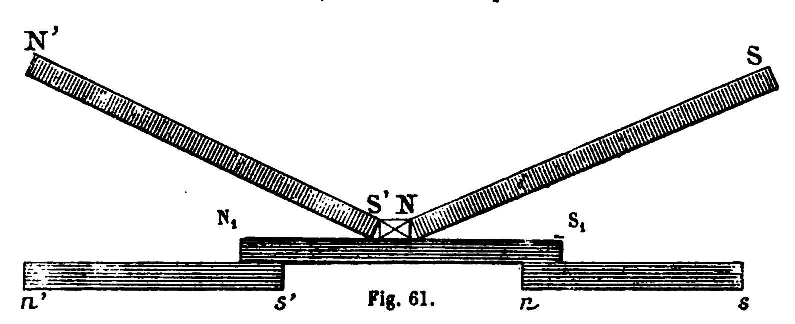


Fig. 61.

3° *Double touche séparée.* — Elle ne diffère de la méthode précédente que par un point : au lieu de déplacer en bloc tout le système sur la barre, on écarte NS vers la droite, N'S' vers la gauche et simultanément jusqu'aux extrémités de la pièce d'acier. Cela fait, on reporte les aimants dans la partie médiane, sans les faire glisser et on recommence le frottement comme au début. Les pôles se disposent exactement comme dans la méthode de la double touche unie.

Si l'on a besoin d'aimanter une aiguille, on peut n'avoir pas sous la main les quatre aimants indiqués dans les procédés précédents ; un simple aimant en fer à cheval suffit : on dispose l'aiguille contre les deux extrémités et on la fait frotter plusieurs fois dans le sens de sa longueur : la disposition des pôles est l'inverse de celle des pôles du fer à cheval.

Quel que soit le procédé employé pour l'aimantation, il faut toujours un morceau d'acier préparé spécialement. On fait la trempe de diverses façons : à l'eau, à l'huile ou au mercure, ou bien encore, dans les aimants, marque Clémandot, on provoque une trempe mécanique en comprimant l'acier non trempé à la presse hydraulique.

La trempe terminée, on soumet l'acier à un recuit prolongé de 20 à 30 heures à la température de 100°, après quoi on procède à l'aimantation. Un nouveau recuit de quelques heures, moins long que le premier, donne au magnétisme une grande constance.

L'intensité d'aimantation est très variable d'un barreau à un autre. Le maximum qui semble obtenu est 225 unités CGS pour certains aimants Marchal de dimensions moyennes : section = 1 centimètre carré environ, longueur = 10 centimètres. Pour des modèles plus allongés on dépasserait cette valeur.

La force portante correspondant à une telle aimantation est d'environ 400 grammes par centimètre carré ; ce poids varie comme le carré de l'intensité d'aimantation.

Conservation des aimants. — Supposons un faisceau magnétique constitué par un certain nombre de feuillets réunis. Les divers pôles en contact sont de même nom ; ils exercent l'un sur l'autre une action répulsive qui tend à détruire l'aimantation

du système. Cette action démagnétisante est surtout dangereuse pour les feuillets centraux. On peut l'éviter, ou au moins l'atténuer, en faisant usage d'*armatures*. Ce sont des lames de fer garnissant les extrémités du faisceau. Ce métal s'aimante par l'influence et l'action des pôles développés ainsi est de maintenir le magnétisme sur le barreau. Mais il est évident qu'on ne supprime pas le flux démagnétisant dont il a été question précédemment.

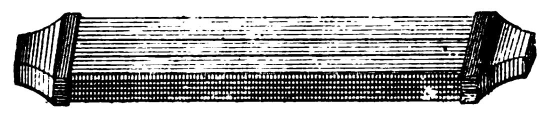


Fig. 62

La conservation d'un système de deux aimants est plus certaine : on les met parallèlement, leurs pôles contraires en regard et on a soin de les séparer par une cale non

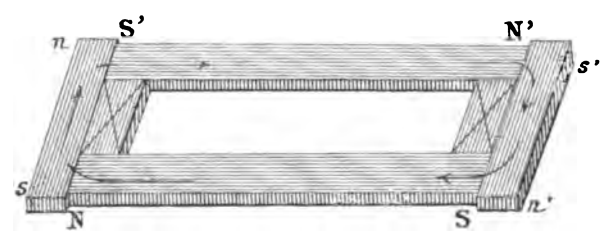


Fig. 63

magnétique pour empêcher leur réunion. Cela fait, on pose devant chaque couple de pôles des armatures de fer doux qui subissent l'influence comme on le sait, et complètent le circuit magnétique fermé (fig. 63).

La même disposition produit le même effet dans le cas d'un aimant en fer à cheval : les deux pôles sont alors en regard et l'armature consiste simplement en une pièce de fer posée contre les deux extrémités ; ce métal magnétique assure le passage des lignes de force et le circuit est encore fermé si l'armature est bien ajustée sur les extrémités de l'aimant.

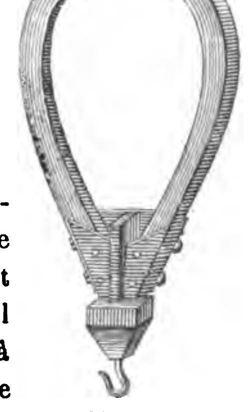


Fig. 64

L'expérience a montré qu'il y a avantage à faire porter à l'aimant une charge permanente. On peut même, si l'on augmente progressivement et lentement ce poids, accroître très sensiblement la force portante : c'est ce qui est appelé *nourrir l'aimant*. Mais il ne faut pas abuser de cette propriété, car si les pièces viennent à se détacher par un excès de charge, la force portante retombe brusquement au-dessous de sa valeur initiale.

Aimantation par la terre. — Souvent les pièces d'acier et même de fer présentent les caractères des aimants. Il suffit, en effet, qu'elles aient été soumises à des chocs pendant qu'elles étaient placées dans le champ de la terre. Les mouvements communiqués favorisent l'orientation des molécules magnétiques et la force coercitive empêche ensuite le retour à l'état primitif. L'action est maxima quand la barre métallique est dans la direction même de la force magnétique terrestre.

La torsion produit d'ailleurs le même effet que le choc.

CHAPITRE IV

MAGNÉTISME TERRESTRE

Direction du champ terrestre. — Ce champ peut être considéré comme uniforme en un lieu donné et surtout dans une salle. L'action exercée sur un aimant se réduit, comme nous le savons, à un couple de forces. Nous allons en chercher la direction. Pour la trouver, le moyen consisterait à suspendre librement une aiguille par son centre de gravité; cette aiguille prendrait forcément pour direction celle de la force terrestre. Mais il est impossible de réaliser une telle suspension; nous devons prendre un barreau mobile autour d'un axe, de sorte que l'orientation du champ magnétique terrestre ne peut être déterminée ainsi, au moins par une seule expérience. Nous aurons donc à revenir sur ce problème.

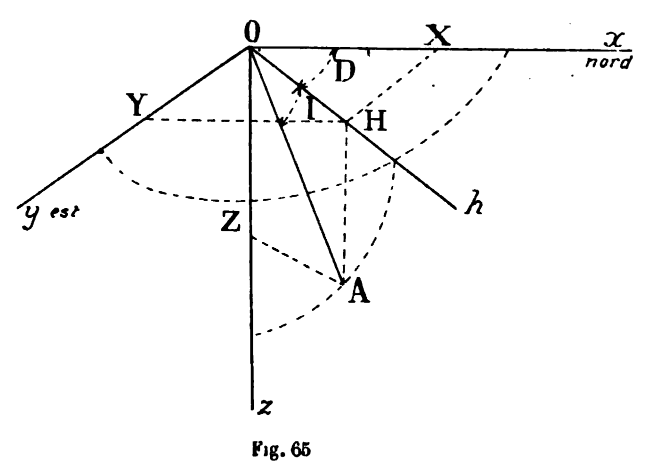


Fig. 65

Supposons, pour le moment, que l'on connaisse cette direction de la force terrestre, soit OA. Menons autour d'un point O les trois directions : Oz verticale, Ox nord géographique, Oy est géographique,

Faisons passer un plan par OA et par Oz ; il est vertical mais se distingue en général de zOx, qui est le *méridien astronomique* ou *géographique*.

Nous conviendrons d'appeler le plan zOA : *méridien magnétique*.

Pour fixer la position de OA dans l'espace, il nous faut d'abord connaître la direction de zOA; nous la déterminerons par l'angle dièdre des deux méridiens. Cet angle se mesure encore par l'angle plan hOx (Oh étant la trace horizontale de zOA). On l'appelle *déclinaison* et nous en avons la définition suivante :

La déclinaison est l'angle dièdre aigu formé par le méridien magnétique et le méridien géographique.

Elle est *orientale* ou *occidentale* suivant qu'elle se compte à l'est ou à l'ouest du nord astronomique.

On sait qu'en astronomie la trace horizontale du méridien Ox est appelée *méridienne*; nous nommerons aussi *méridienne magnétique* la trace horizontale Oh du méridien magnétique.

La déclinaison est donc encore l'angle aigu des deux méridiennes.

La position du méridien magnétique étant repérée par la déclinaison, il nous reste à fixer, dans ce plan, la direction OA; on prend l'angle AOh que l'on désigne sous le nom d'*inclinaison*.

L'inclinaison est l'angle de la direction de la force avec sa projection horizontale.

Intensité du champ terrestre.— La définition générale de l'intensité d'un champ magnétique est applicable ici; nous supposerons placé en O un pôle Nord unité et nous chercherons à quelle force il est soumis, soit OA (fig. 65).

Cette action peut, suivant les règles de la mécanique, se décomposer en plusieurs autres. D'abord, si nous la projetons verticalement et horizontalement, nous obtenons les deux composantes OZ et OH capables de remplacer ensemble l'action OA. On les appelle respectivement : *composante verticale* Z et *composante horizontale* H. Si nous appelons F l'intensité du champ OA :

$$F = OA$$

nous avons :

$$Z = F \sin I$$
$$H = F \cos I$$

Nous pourrions pousser la décomposition plus loin encore, remplacer H par les deux forces X et Y.

Supposons une aiguille mobile dans un plan horizontal; elle n'est soumise qu'à la composante horizontale H; Z n'a d'autre effet que d'agir sur l'axe de suspension, car il tend à faire sortir le barreau de son plan, ce qui n'est pas possible; l'aiguille prend alors forcément la direction Oh; la déclinaison peut ainsi se déterminer.

De même, prenons un aimant mobile dans un plan vertical seulement; la force Z agit alors, mais en même temps, selon la position du plan vertical, une composante horizontale intervient et l'aiguille est soumise à deux forces. En particulier, si le plan du mouvement est hOz, l'aiguille est sollicitée par la force F elle-même et elle se place suivant OA. On peut ainsi connaitre l'*inclinaison*.

Mesure de la déclinaison. — L'aiguille est mobile dans un plan horizontal autour d'un axe vertical. Ordinairement elle est munie d'une petite chape d'agate qui



repose sur un pivot très délié. Elle indique alors immédiatement la méridienne magnétique, mais ce résultat a besoin d'être contrôlé. L'aimant a en effet la forme d'un losange allongé et nous prenons pour sa direction celle des deux pointes; ce n'est pas certainement l'axe magnétique, et par suite nous devons effectuer une correction: supposons que l'axe magnétique soit *mn* (fig. 67); nous retournons l'aiguille face pour face; l'axe conserve toujours la même direction, mais maintenant les extrémités de l'aiguille, si elles ne coïncident pas avec les pôles, sont portées en *a'* et *b'* (fig. 68). On note cette nouvelle position.

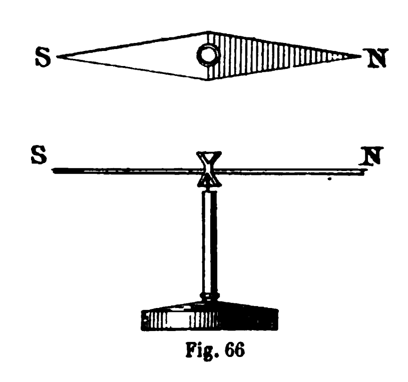


Fig. 66

Il s'agit, pour trouver l'angle de déclinaison, de connaître la méridienne géographique du lieu, soit la droite NS; elle est ordinairement donnée. On place alors suivant NS la direction 0 — 180° du cercle gradué qui supporte l'aiguille et on peut faire les

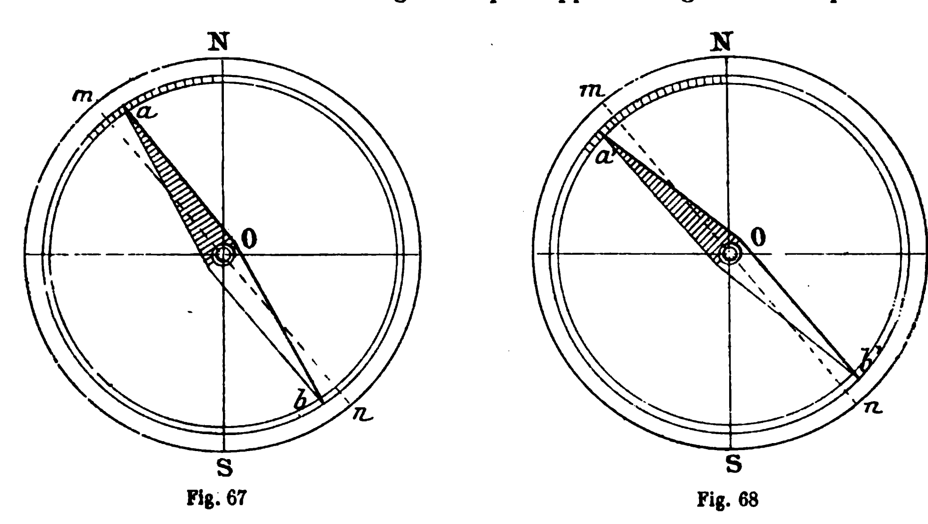


Fig. 67 Fig. 68

lectures d'angles *a*ON et *a'*ON. Leur moyenne nous fournit la déclinaison. On corrige d'ailleurs la dissymétrie de l'aiguille elle-même en prenant aussi les angles *b*OS et *b'*OS et en calculant la moyenne des quatre angles mesurés.

Pratiquement la boussole de déclinaison est formée d'une boîte de cuivre rouge, au centre de laquelle est soutenue l'aiguille (fig. 69); deux montants de cuivre font corps avec la boîte; ils soutiennent un axe horizontal sur lequel est fixée une lunette astronomique et cette lunette se déplace dans un plan vertical qui fixe le zéro de la graduation. D'après cette disposition, quand la boite de cuivre tourne, et elle peut se déplacer comme on le voit autour du pied de l'instrument, elle entraîne avec elle la lunette; une graduation fait connaître la grandeur de cette rotation.

Cela posé, pour déterminer la déclinaison, on tourne la lunette de façon à viser la direction repérée du nord géographique et on note la position du vernier sur le cercle

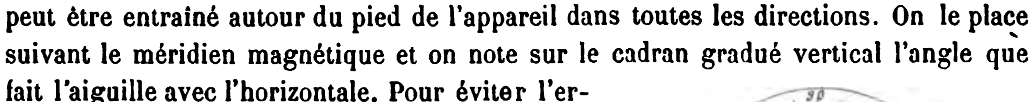
divisé ; on fait ensuite mouvoir toute la partie mobile jusqu'à ce que le plan de la lunette, qui est indiqué intérieurement à la boîte par un index, vienne en coïncidence avec l'aiguille. L'angle de déplacement donne, sauf les corrections indiquées page 56, la valeur de la déclinaison.

Cette grandeur est très variable. Elle change d'un lieu à un autre, et, dans un même lieu, elle dépend de l'instant de la mesure : on constate en effet des variations régulières et d'autres accidentelles liées intimement aux phénomènes météréologiques. Actuellement la déclinaison est occidentale ; elle avait pour valeur au parc Saint-Maur, le 1er janvier 1900 :

$$D = 14°45'$$

Fig. 69

Mesure de l'inclinaison. — La boussole d'inclinaison consiste essentiellement en une aiguille mobile dans un plan vertical et ce plan



peut être entraîné autour du pied de l'appareil dans toutes les directions. On le place suivant le méridien magnétique et on note sur le cadran gradué vertical l'angle que fait l'aiguille avec l'horizontale. Pour éviter l'erreur provenant d'un manque de symétrie de l'axe magnétique du barreau, on opère un retournement de l'aiguille face pour face puis on fait une deuxième lecture ; la moyenne des deux donne la vraie valeur de l'inclinaison.

Cet angle aussi est sujet à variation ; il dépend du lieu où l'on opère et change avec le temps.

Dans notre hémisphère, le pôle Nord plonge sous l'horizon ; à l'équateur l'inclinaison est nulle et dans l'hémisphère austral, le pôle Nord est au-dessus du plan horizontal.

L'inclinaison égalait, au parc Saint-Maur, le 1er janvier 1900 :

$$I = 64°56'$$

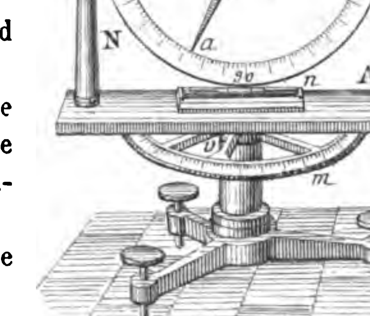


Fig. 70.

Valeur de l'intensité du champ magnétique terrestre. — C'est, dans le système CGS, la force, en dynes, qui agit sur un pôle Nord ayant une quantité unité de magnétisme. On détermine directement la composante horizontale de cette force, d'après les oscillations qu'exécute une aiguille aimantée mobile ; connaissant H et l'in-

clinaison, il est facile de passer à la valeur de la force F elle-même, car on a

$$H = F \cos I$$

d'où :

$$F = \frac{H}{\cos I}$$

On avait ainsi au parc Saint-Maur, le 1er janvier 1900 :

$$F = 0,46498 ; \qquad H = 0,197$$

Boussole marine. — C'est une sorte de boussole de déclinaison destinée à diriger les navigateurs en leur indiquant à chaque instant la direction du nord de la terre.

Cette boussole ou *compas* est placée à l'arrière du navire dans l'habitacle. Elle consiste en une boîte cylindrique suspendue à la Cardan de façon à conserver sa position horizontale. De la partie inférieure part une colonne de cuivre qui porte à son extrémité une pointe d'acier trempé qui supporte le cône d'agate serti au centre de l'aiguille. Cette aiguille est recouverte d'une *rose des vents* à trente-deux branches et correspond à la direction nord, marquée d'ailleurs d'une étoile; la position de cette étoile fixe le nord magnétique. On a repéré sur la boîte un point *d* qui forme avec l'axe de la boussole, la *ligne de foi*, droite parallèle à la quille du vaisseau.

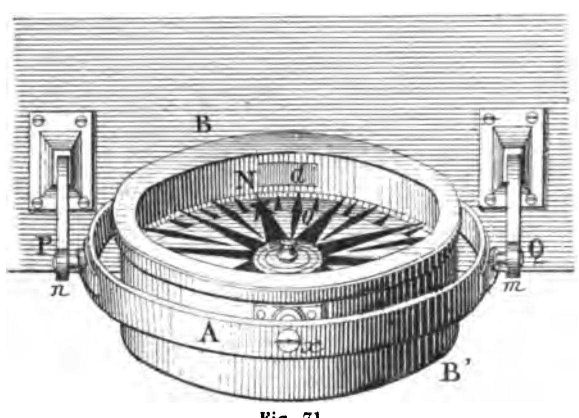


Fig. 71

D'après les cartes marines, on sait quelle orientation il convient de donner au navire; on manœuvre donc le gouvernail de manière à faire coïncider la direction voulue, observée sur la rose des vents, avec la *ligne de foi*.

Seulement il y a lieu de corriger les indications suivant les variations de la déclinaison aux divers points du globe.

Le compas est soumis à l'action de plusieurs causes perturbatrices dont la principale est due aux grandes masses magnétiques qui entrent dans la construction du navire : les aciers sont aimantés pendant leur séjour sur les chantiers (la partie située au nord forme un pôle Nord et l'autre un pôle Sud). Quant aux fers doux ils s'aimantent par l'influence des pièces précédentes (d'une manière invariable) et par l'influence terrestre pendant la route (d'une façon variable). Pour obtenir la *compensation*, on dispose, à la base de l'habitacle, un massif percé de trous dans deux sens perpendiculaires et dans lesquels on peut placer des aimants. En outre deux équerres l'une à droite, l'autre à gauche, portent deux sphères de fer doux dont la distance à l'aiguille est réglable. Enfin un tube vertical reçoit des cylindres de fer doux.

TROISIÈME PARTIE

COURANT ÉLECTRIQUE

CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS SUR LA PRODUCTION DU COURANT

Définition du courant. — Nous avons étudié, dans la première partie, l'électricité à l'état d'équilibre dans les conducteurs. Cet état est lié à la constance du potentiel en tous les points du corps. Si, par un moyen quelconque, nous provoquons une différence dans les valeurs du niveau électrique, nous rompons l'équilibre, car une force prend naissance, dirigée dans le sens des potentiels décroissants ; l'électricité est alors à l'état *dynamique*.

Pour nous rendre compte de ce qu'on appelle *courant électrique*, imaginons un condensateur relié par une armature à la terre, par l'autre, à une machine capable de fournir l'électricité en quantité illimitée, toujours au même potentiel et disposons un fil métallique entre les deux armatures.

Ce conducteur réunit deux points à des potentiels différents ; il est le siège d'un déplacement électrique qui produirait la décharge rapide du condensateur si la machine ne réparait pas les pertes au fur et à mesure. Ce mouvement constamment répété constitue un *courant électrique*. Quant à sa nature intime, elle est difficile à fixer ; on *admet* ordinairement que l'électricité positive se déplace seule pour aller neutraliser l'électricité contraire supposée immobile. Cette supposition est absolument gratuite ; c'est d'ailleurs une façon de dire conventionnelle plutôt qu'une hypothèse.

D'après cela :

Un courant électrique est un déplacement continu d'électricité positive d'un point à un autre dans le sens des potentiels décroissants.

Expériences de Galvani et de Volta. — Le point de départ de l'électricité dynamique mérite d'être indiqué. Galvani, médecin à Bologne, vers la fin du siècle dernier, avait suspendu des grenouilles fraîchement dépouillées à un balcon extérieur dans l'intention d'étudier l'action de l'électricité atmosphérique sur ces corps inanimés. Il constata avec surprise des commotions violentes dans les muscles des cuisses chaque fois que le vent amenait l'animal contre les barres du balcon. La cause du phénomène échappa à Galvani, mais Volta, physicien de la même époque, remarqua que le balcon était en *fer* et que le crochet de suspension engagé entre la colonne vertébrale et les nerfs, était en *cuivre*. Avec un crochet de fer, rien de semblable; donc la cause du phénomène réside dans l'assemblage des deux métaux différents. Alors la grenouille ne sert pas à la production de l'électricité, comme Galvani le pensait; elle joue simplement le rôle d'électroscope.

Loi du contact. — Comme conséquence de ce raisonnement et de toute une série d'expériences, Volta a été conduit à la *loi* dite du *contact*. On peut l'énoncer aujourd'hui de la façon suivante, en admettant qu'il n'y ait pas de changement de température :

Toutes les fois que deux conducteurs différents sont en contact il s'établit entre eux une différence de potentiel.

On peut ajouter, pour compléter cet énoncé :

Cette différence de potentiel dépend seulement de la nature des conducteurs. Elle ne varie ni avec l'étendue et la forme de la surface de séparation, ni avec le volume des deux corps, ni enfin avec les valeurs que le potentiel peut avoir sur chacun avant le contact.

Citons, à l'appui de cette loi, une seule expérience de Volta :

Soient deux plateaux, l'un de zinc, l'autre de cuivre, tenus par des manches isolants ; on les place l'un sur l'autre puis, après séparation, on étudie l'état d'électrisation de chacun d'eux au moyen de l'électroscope condensateur : on trouve le cuivre négatif et le zinc positif.

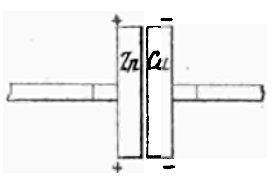


Fig. 72

C'est là une conséquence de la loi du contact : si un des métaux prend un potentiel supérieur au potentiel de l'autre, un déplacement d'électricité positive en résulte chargeant positivement le corps qui reçoit l'électricité et laissant à l'autre une masse négative. Nous trouvons le zinc en possession d'électricité positive; c'est qu'il avait un niveau électrique moindre que celui du cuivre.

Ce développement d'électricité par simple contact n'est d'ailleurs pas un fait nouveau pour nous ; ce n'est qu'un cas particulier de l'électrisation par frottement. Nous avons vu alors les deux corps se charger d'une façon contraire ; le simple contact produit le même effet et transforme l'assemblage Zn—Cu en une sorte de condensateur qui tient sur ses deux faces en regard les deux électricités opposées. Au moment de la rupture

ces charges s'attirent mutuellement ; on doit vaincre cette action pour opérer la séparation des deux parties ; c'est là l'origine de l'énergie électrique communiquée à chaque métal.

Si l'on pouvait, dans notre expérience, rendre, par un moyen quelconque, au cuivre l'électricité + qu'il perd, l'état initial des deux conducteurs serait rétabli et l'on aurait chance de voir les phénomènes se reproduire indéfiniment en donnant un véritable courant électrique.

Pour provoquer cette recharge du cuivre, le moyen qui se présente à première vue consiste à relier l'une à l'autre les extrémités libres des lames. Mais ce procédé est défectueux en ce sens que l'on n'a pas ainsi un conducteur simple, mais on forme une nouvelle soudure *Zn* — *Cu* qui tend à provoquer un passage d'électricité opposé à celui que nous voulons créer. Le courant est donc impossible de cette manière.

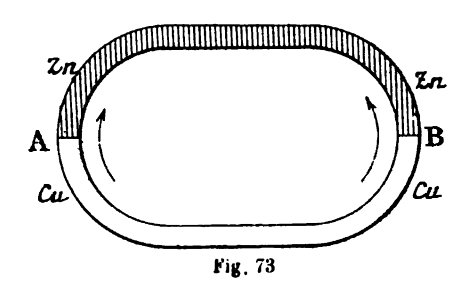


Fig. 73

Une autre raison s'oppose d'ailleurs à ce retour : nous n'aurions qu'un travail minime à fournir pour installer les conducteurs avec leurs deux soudures. Or un courant est une source permanente d'énergie et ne peut être établi en conséquence sans une dépense équivalente.

Nous avons considéré deux métaux réunis, le zinc et le cuivre, mais nous pourrions faire toute une chaîne métallique terminée d'un côté par du cuivre, de l'autre par du zinc (fig. 74). La théorie et l'expérience montrent que la différence de potentiel des deux extrémités est *Zn* — *Cu*, c'est-à-dire *la même que si les deux métaux extrêmes étaient en contact immédiat.*

Zn	Fe	Ag	Pb	Al	Sn	Cu

Fig. 74

Ce résultat nous enseigne que la *soudure* interposée pour réunir les deux métaux est sans influence sur la force électromotrice de contact.

Répétons qu'on a exclu tout liquide des considérations précédentes. On a supposé en outre la température constante en tous les points des conducteurs.

Pile électrique. — Ainsi il est entendu qu'une chaîne métallique fermée, présentant deux soudures identiques, ne peut donner aucun courant parce que les effets de l'un des contacts annulent ceux de l'autre soudure.

Si nous voulons un écoulement continu d'électricité dans ce conducteur fermé, nous devons modifier un des contacts de manière à engendrer, sous une forme quelconque, l'énergie qui doit se transformer en travail électrique. Deux manières se présentent :

1° *Interposer* dans la chaîne, entre les deux métaux, un *liquide* capable d'agir chimiquement sur l'un au moins des conducteurs (fig. 75).

2° *Chauffer l'une des soudures* en laissant la seconde à la température ambiante.

On produit ainsi une dissymétrie des contacts dans les deux cas.

Dans le premier, le liquide attaque un métal, d'où une dépense d'énergie sous la forme chimique. L'appareil est semblable à lui-même tant qu'il reste du métal attaquable et du liquide ; par suite, la différence de potentiel se maintient constante et le courant qui en résulte persiste. L'ensemble constitue une *pile électrique ;* on le qualifie des noms : *pile chimique* ou *hydroélectrique*. Le premier modèle a été construit par Volta, en 1800.

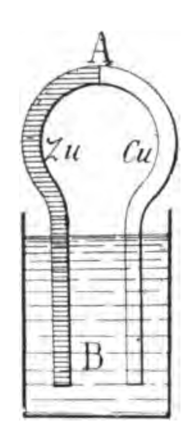



Fig. 75

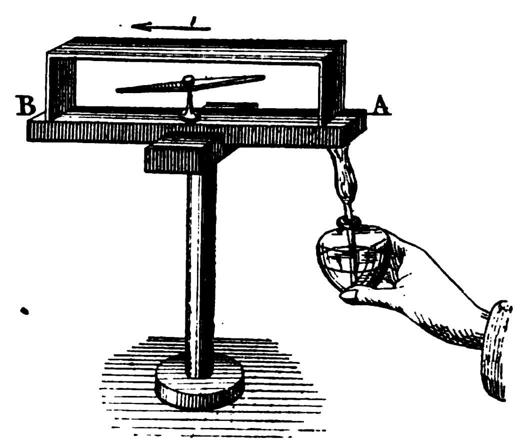


Fig. 76

La seconde manière d'engendrer un courant au moyen d'une chaîne métallique, consiste, avons-nous dit, à chauffer l'*une* des soudures. La dépense de chaleur, en modifiant le contact, pourvoit à la consommation d'énergie que l'on pourra faire dans le courant obtenu. Ici nous assistons à la transformation de l'énergie *calorifique* en *énergie électrique*. L'appareil porte le nom de pile *thermo-électrique*. Il a été réalisé, pour la première fois, par Seebeck, en 1821, au moyen du dispositif suivant : un cadre est formé de deux métaux, bismuth et antimoine par exemple, réunis par leurs extrémités A et B (fig. 76). A l'intérieur est suspendue une aiguille aimantée mobile destinée à accuser le courant par sa déviation (voir expérience d'Œrsted). Chauffons la soudure A, l'aiguille tourne dans un certain sens, ce qui prouve l'existence d'un courant électrique. Le courant s'annule si nous laissons le point A se refroidir ou encore si nous chauffons aussi l'extrémité B.

De plus, après refroidissement, chauffons la soudure B seule ; nous voyons l'aimant tourner en sens contraire du premier ; le courant est donc renversé : il marche toujours du bismuth vers l'antimoine à travers le point chauffé.

Une chaîne modifiée comme on vient de le dire, constitue un *élément* de pile ou un *couple*.

Réduite à un élément, la pile est souvent insuffisante. On la compose alors d'un certain nombre de couples.

Dans le procédé primitif (pile à colonne de Volta) on a des rondelles obtenues en soudant un zinc avec un cuivre. On les empile toutes en les orientant de la même façon et en séparant deux consécutives d'un morceau de drap imprégné d'eau acidulée.

On constitue ainsi autant de couples qu'il y a de ronds d'étoffe, car chacun de ces éléments est formé d'une lame de cuivre et d'une lame de zinc séparées par l'acide (fig. 77).

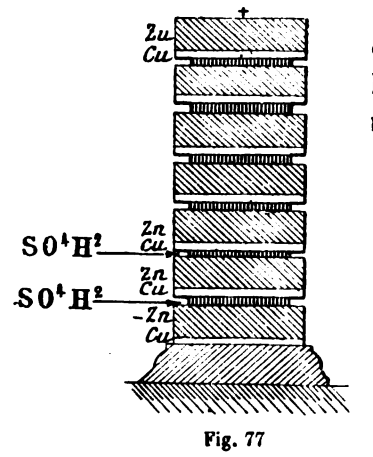


Fig. 77

Dès lors les effets s'ajoutent et, si un élément présente, entre ses deux métaux, une différence de potentiel v, les n couples de la colonne auront une force électromotrice égale à : nv.

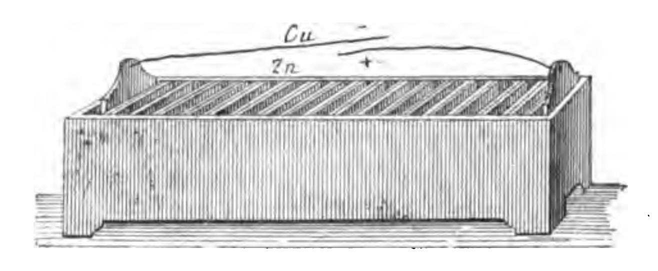


Fig. 78

Dans cette pile le poids des lames est un obstacle au bon fonctionnement : le liquide fortement pressé coule, en effet, le long des métaux. On a substitué au premier modèle une pile horizontale formée d'une caisse longue, bien étanche séparée en compartiments par des doubles lames $Zn - Cu$. Dans les intervalles, on verse de l'eau acidulée (fig. 78).

Enfin, dans les modèles actuels, on sépare tous les éléments les uns des autres et

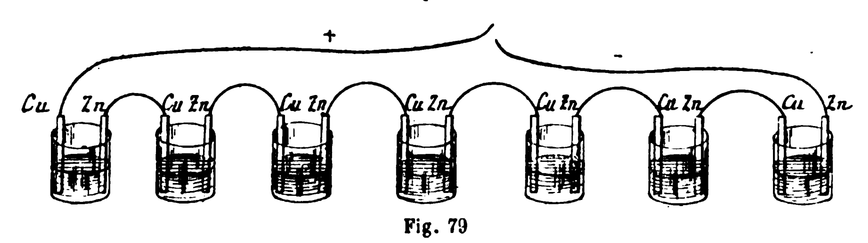


Fig. 79

on forme ainsi une pile à tasses (fig. 79). Chaque bocal de cette série, avec sa lame de cuivre et sa lame de zinc, constitue un couple Volta.

2° On opère de même pour les piles thermo-électriques : on forme une chaîne (fig. 80), comprenant des lames alternées et repliées de manière à présenter d'un même côté toutes les soudures de rang impair et de l'autre les soudures paires. On peut ainsi chauffer en même temps toutes les premières et laisser les secondes à la température ambiante.

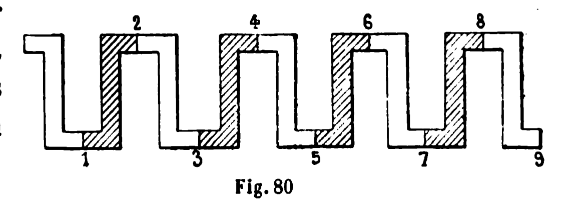


Fig. 80

Pôles de la pile. — Ce sont les extrémités des lames métalliques qui plongent dans le liquide (si nous prenons un couple Volta).

Pour distinguer les deux pôles, on peut les réunir chacun à un plateau d'un condensateur d'électricité : l'un prend une charge positive, l'autre présente une masse

négative. On donne alors aux deux pôles les noms respectifs de *pôle positif* et de *pôle négatif*.

Dans l'élément Volta, le pôle + est le cuivre ; le zinc constitue le pôle — .

D'une façon générale, quand on emploie à la confection de la pile des métaux différents, le pôle négatif est formé par le métal attaquable.

Si on réunit, extérieurement à la pile, les deux pôles par un conducteur, le courant a lieu du pôle + au pôle — puisque c'est le sens de la décroissance du potentiel.

Force électromotrice de la pile. — Les deux pôles étant séparés, on constate entre eux une différence de potentiel déterminée. On l'appelle *force électromotrice* de l'élément puisque c'est là la cause du courant électrique.

Cette donnée caractéristique de la pile s'exprime, dans la pratique, au moyen d'une unité appelée le *volt*.

Quant à la valeur même du potentiel aux deux pôles, elle varie suivant les circonstances, pour une pile donnée. Ainsi, par exemple, soit un élément de force électromotrice 1 volt ; nous pouvons relier le pôle — à la terre ; ce pôle prend alors le potentiel zéro et le pôle + se trouve naturellement au potentiel 1 volt (puisqu'il y a 1 volt de différence au profit du pôle +).

Vient-on, au contraire, à établir une communication du pôle + au sol ; le pôle opposé (—) voit son potentiel tomber à — 1 volt (un potentiel est négatif quand le déplacement de l'électrictité positive du point considéré au sol absorbe du travail au lieu d'en produire).

Enfin si le pôle — est uni à un corps au potentiel V, le pôle + est au niveau V + 1.

Ainsi la différence seule est fixée pour cette pile déterminée.

Remarque. — Ne perdons pas de vue que la force électromotrice est la différence entre les potentiels des deux pôles supposés *séparés*. Si on établit le courant par réunion des lames, cette inégalité de niveau diminue beaucoup, comme nous le verrons plus loin. Aussi ne faut-il jamais compter pratiquement, même avec une pile parfaite, sur une différence de potentiel entre les pôles égale à la force électromotrice de la pile.

Intensité du courant. — Nous connaissons le sens de l'électricité à l'extérieur de la pile. Les effets de ce passage se manifestant aussi intérieurement, nous devons compléter le circuit comme l'indique la figure 81. C'est là le *sens du courant*. Quant au déplacement il peut être ou *uniforme* ou *varié* :

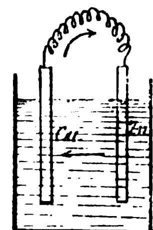


Fig. 81

1° Il est uniforme quand les quantités d'électricité transportées pendant les mêmes intervalles de temps sont égales. Alors on appelle *intensité du courant* la quantité d'électricité qui passe par unité de temps dans le circuit. Soit q la quantité transportée pendant un temps t ; on a pour intensité

$$I = \frac{q}{t}.$$

Or, dans la pratique les charges électriques se mesurent en *coulombs* et les temps

se comptent en secondes. L'intensité s'exprime alors au moyen d'une unité qui découle des deux autres et qu'on appelle l'*ampère*. Le courant a, comme on voit, l'intensité unité, soit d'un ampère, quand la masse déplacée est d'un coulomb par seconde. Ce choix fait, il suffit de diviser le nombre de coulombs q par le temps en secondes pour obtenir l'intensité en ampères ;

2° L'écoulement peut être irrégulier. Soit q la quantité d'électricité déplacée pendant tout le temps qui s'est écoulé depuis l'origine du courant. Considérons un accroissement infiniment petit du temps, soit dt ; il correspond au passsage d'une masse électrique dq. On peut alors, en rapportant à l'unité de temps l'écoulement de l'électricité, écrire :

$$I = \frac{dq}{dt}.$$

C'est, comme on le voit, la dérivée de la quantité d'électricité prise par rapport au temps.

CHAPITRE II

LOI D'OHM

Propagation de l'électricité dans un fil cylindrique. — Considérons une source de force électromotrice constante et égale à E. Si nous réunissons les deux pôles par un conducteur, nous obtenons un courant dont l'intensité dépend de la nature et des dimensions du fil. De plus, le long de ce conducteur, le potentiel varie et, en chaque point, il prend une valeur invariable lorsque le courant circule déjà depuis quelque temps.

Ohm, le premier, a étudié le courant à ce point de vue.

On trouvera dans les paragraphes suivants les résultats indispensables dans la pratique, c'est-à-dire :

1° La variation du potentiel le long d'un fil cylindrique. Elle ressort nettement des tracés graphiques des pages 68 et 70;

2° La relation qui existe entre la force électromotrice de la source et les constantes du fil (loi d'Ohm proprement dite, page 69). Pour compléter ces connaissances sommaires, nous devrons apprendre à calculer les résistances des conducteurs au moyen de coefficients consignés dans des tables spéciales (pages 72 et 73).

Ces indications données, voyons à établir les formules d'Ohm. Nous nous appuierons d'abord sur le principe suivant :

Le courant électrique, dû à une différence de potentiel, est d'autant plus intense, toutes choses égales d'ailleurs, que cette différence de niveau est plus grande. Nous pourrons même, si nous choisissons deux points très voisins, considérer la charge électrique qui va de l'un à l'autre comme proportionnelle à la variation du potentiel entre ces deux points.

Soit donc un conducteur cylindrique de longueur l et de section s reliant deux

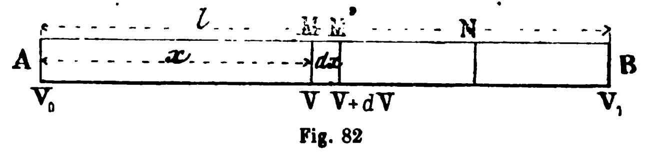


Fig. 82

corps A et B aux potentiels V_0 et V_1 invariables ($V_0 > V_1$) (fig. 82). Puisque le niveau est le même sur tous les points de chacune des sections A et B, nous pourrons en dire autant pour toutes les sections droites du cylindre; M, par exemple est, comme A et B,

une surface de niveau. Soit V ce potentiel en M, à une distance x de l'origine A; sur le plan M' distant de M d'une quantité infiniment petite dx, le potentiel est un peu plus petit que V; il égale $V + dV$ (la variation dV étant négative puisque $V_0 > V_1$). Le potentiel varie donc par unité de distance, à partir de M, de :

$$\frac{dV}{dx}$$

Nous allons écrire que la quantité d'électricité qui va par seconde de M à M', c'est-à-dire l'intensité I au point M, est proportionnelle à $\frac{dV}{dx}$; elle croît également dans le même rapport que la section de passage s, car si nous divisons par la pensée le cylindre en filets élémentaires tous égaux, chacun d'eux est traversé par une égale quantité d'électricité. Nous poserons donc, en employant une constante A positive :

$$(1) \qquad I = -As\frac{dV}{dx}$$

(On a mis le signe —, car $dV < 0$, alors que I, A et s sont positifs).

Après quelque temps de fonctionnement, le régime permanent est établi, c'est-à-dire que le potentiel conserve en chaque point une valeur invariable. Alors l'électricité s'écoule dans le fil sans s'accumuler en aucun endroit (ce qui ferait changer le potentiel). Donc la charge qui traverse M est aussi celle qui passe en N; autrement dit, I est une quantité constante indépendante de la position de M c'est-à-dire de x :

$$I = -As\frac{dV}{dx} = \text{const.}$$

ce qui nous permet de poser :

$$(2) \qquad \frac{dV}{dx} = m$$

m étant une constante, puisque A et s ne varient pas. Nous pouvons porter cette valeur de $\frac{dV}{dx}$ dans l'expression de I, ce qui nous donne :

$$(1') \qquad I = -Asm.$$

Variation du potentiel le long d'un fil cylindrique. — Pour calculer V en fonction de x, il suffit d'intégrer l'équation (2). On a :

$$(3) \qquad V = \int m dx = mx + n.$$

L'intégration introduit la deuxième constante n. Nous déterminerons les valeurs de m et de n par la considération des limites :

1° Pour $x = o$, point A, le potentiel égale V_0; portant ces valeurs dans (3), nous avons :

$$V_o = n.$$

La constante n est donc déterminée.

2° Soit $x = l$, point B, V devient V_1 ; donc (3) donne, en tenant compte de $n = V_0$:

$$V_1 = ml + V_0 ;$$

d'où :

$$m = \frac{V_1 - V_0}{l} = -\frac{V_0 - V_1}{l},$$

Nous pouvons maintenant porter ces valeurs des deux constantes dans l'expression de V ; il vient :

$$V = V_0 - \frac{V_0 - V_1}{l} x. \quad (4)$$

Nous aurons dès lors aisément le potentiel V en un point M distant de l'origine du fil d'une longueur x. Nous voyons que :

Le potentiel décroît en progression arithmétique dans le sens du courant.

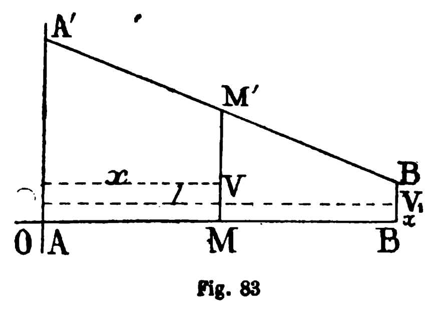


Fig. 83

Nous pouvons évaluer graphiquement ce potentiel : construisons pour cela la ligne droite représentée par l'équation (4), soit A' B', en portant $AB = l$, $AA' = V_0$ et $BB' = V_1$. Si nous voulons avoir le potentiel en M, nous n'avons qu'à mesurer l'ordonnée MM'.

Loi d'Ohm. — Si maintenant nous portons la valeur de m dans l'expression de I (1'), il vient :

$$I = -Asm = As\frac{V_0 - V_1}{l} \quad (5)$$

La différence des niveaux V_0 et V_1, soit $V_0 - V_1$, est la force électromotrice ; désignons-la par E, nous avons :

$$I = As\frac{E}{l}$$

que nous transformons identiquement en :

$$I = \frac{E}{\frac{l}{As}} \quad (6)$$

Voyons quel sens il convient d'attribuer au dénominateur $\frac{l}{As}$. Cette expression est proportionnelle à la longueur du conducteur et varie en raison inverse de la section du même fil. Or, l'électricité, en traversant ce conducteur, éprouve une certaine résistance d'autant plus grande que la longueur est plus considérable et réduite en même temps que la section augmente. Il est donc logique de prendre $\frac{l}{As}$ pour mesure de la résistance R rencontrée. Nous poserons donc :

$$R = \frac{l}{As} \quad (7)$$

et il viendra alors :

$$(8) \qquad I = \frac{E}{R}$$

d'où la loi d'Ohm :

L'intensité du courant égale le quotient de la différence des potentiels des extrémités par la résistance du conducteur.

Cette loi a été établie dans le cas d'un conducteur cylindrique et homogène, mais elle est très générale ; si en effet nous avons un fil hétérogène et de section variable,

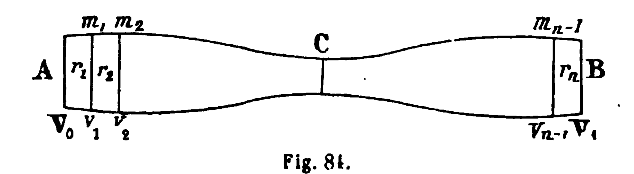


Fig. 81.

nous pouvons toujours le couper en tranches assez petites pour que chacune soit homogène et sensiblement cylindrique ; soient m_1 m_2... m_{n-1} les plans de section sur lesquels le potentiel a les valeurs v_1 v_2...v_{n-1}.

Nous pouvons, par la formule (7), calculer la résistance de chaque tranche ; nous trouvons r_1 r_2,.. r_n.

Évidemment l'intensité est la même en tous les points du conducteur, car l'électricité ne s'accumule pas. Nous pouvons donc écrire, en appelant I cette intensité :

1er tronçon : . . . . $I = \frac{V_0 - v_1}{r_1}$

2e — : . . . . $I = \frac{v_1 - v_2}{r_2}$

. . . .

ne — : . . . . $I = \frac{v_{n-1} - V_1}{r_n}$

nous avons donc :

$$I = \frac{V_0 - v_1}{r_1} = \frac{v_1 - v_2}{r_2} = \ldots = \frac{v_{n-1} - V_1}{r_n}$$

ou, d'après une propriété connue des proportions :

$$I = \frac{(V_0 - v_1) + (v_1 - v_2) + \ldots + (v_{n-1} - V_1)}{r_1 + r_2 + \ldots + r_n}$$

Le numérateur se réduit à $V_0 - V_1$ ou E ; quant au dénominateur, on voit qu'il représente la résistance totale R du conducteur, donc :

$$I = \frac{E}{R}$$

La loi d'Ohm se trouve généralisée.

Nous avons pris le cas de deux extrémités A et B à des potentiels absolument fixes. Un cas plus fréquent dans la pratique est celui où l'on a une source telle que

la pile; les pôles étant séparés, on constate, entre les deux, une différence de niveau E. Supposons que ces deux pôles soient réunis par un fil; le courant qui s'établit traverse le fil et la pile elle-même; il a donc à vaincre une double résistance : R celle du conducteur et r celle de la source. Alors la chute de potentiel se fait dans une résistance totale $R+r$ et on a pour intensité, d'après la loi d'Ohm :

$$I = \frac{E}{R+r}$$

On n'a le droit de supprimer r dans cette formule que si cette quantité est négligeable par rapport à R, ce qui peut avoir lieu, soit quand R est très grand, soit quand r est à peu près nul.

La résistance s'exprime en *ohms* et cette unité est fixée de façon à correspondre à l'ampère et au volt : d'après la formule, la résistance du circuit est d'un *ohm* quand, avec une force électromotrice d'un volt, on obtient une intensité d'un ampère.

Exemple : Supposons une source de voltage égal à 12; le circuit, source comprise, présente une résistance de 3 ohms; nous avons une intensité :

$$I = \frac{12}{3} = 4 \text{ ampères.}$$

Variation du potentiel le long du circuit d'une source. — La quantité d'électricité qui s'écoule dans le circuit est déterminée; elle est la même quel que soit le point observé. Or, si on considère deux points comprenant une résistance donnée, on obtient l'intensité en divisant la différence de niveau par la résistance. Ce quotient est constant, comme on l'a dit, donc la chute de potentiel d'un point à un autre est proportionnelle à la résistance comptée entre les deux.

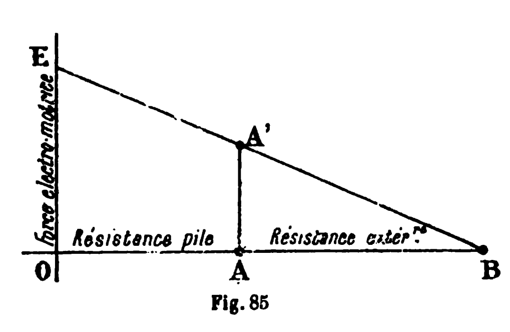


Fig. 85

Pour représenter graphiquement la valeur du niveau, portons en abscisses les valeurs de la résistance OA pour la source, AB pour le fil extérieur. Menons OE égal à la force électromotrice. La chute de potentiel est OE dans le circuit total, elle a lieu par conséquent suivant les ordonnées de la droite EB.

En particulier, entre les deux pôles de la pile, extrémités A et B du fil extérieur, la différence de potentiel est AA' (elle était OE quand la pile n'était pas fermée sur elle-même) et on remarque que cette valeur est d'autant plus considérable que le fil extrapolaire est plus résistant (alors l'intensité du courant est faible).

Valeur de la résistance d'un conducteur. — La résistance d'un fil cylindrique est donnée par l'équation :

$$R = \frac{l}{As}$$

où l est la longueur et s la section. A est une constante dont nous allons maintenant chercher la signification :

Prenons un fil cylindrique de nature déterminée, ayant une longueur et une section égales aux unités de longueur et de surface; sa résistance prend une valeur R_1; exprimons-la ($l=1$, $s=1$) :

$$R_1 = \frac{1}{A}$$

d'où :

$$A = \frac{1}{R_1}$$

La constante est donc l'inverse de la résistance du fil dont la section et la longueur valent l'unité. On lui donne généralement le nom de *conductibilité* ou de *conductivité électrique* (plus A est grand, moins le fil est résistant, plus son pouvoir conducteur est considérable). Elle varie d'ailleurs, comme on le pense bien, d'un corps à un autre. On considère souvent au lieu de A, son inverse $R_1 = \frac{1}{A}$, sous le nom de *résistivité*. Ainsi nous pouvons traduire la formule qui exprime R de la manière suivante :

La résistance d'un conducteur varie :

1° *Proportionnellement à la longueur du fil;*

2° *En raison inverse de sa section;*

3° *Proportionnellement à sa résistivité* $R_1 = \frac{1}{A}$.

Nous voulons exprimer R en ohms. Alors, si nous tenons à être d'accord avec le système CGS, nous devons exprimer l en centimètres et s en centimètres carrés; le coefficient R_1 doit lui-même se rapporter à ces deux unités de longueur et de surface. Mais l'usage qui a prévalu dans la pratique est de compter les longueurs de fils en mètres et les sections en millimètres carrés. La résistivité R_1 est donc la résistance en ohms ou en fraction d'ohm d'un conducteur ayant une section d'un millimètre carré et une longueur d'un mètre. Les valeurs de ce coefficient sont consignées dans le tableau suivant pour quelques conducteurs usuels.

Dans certains cas, par exemple quand on mesure l'épaisseur du fil, on ne connaît pas immédiatement la section, mais on a le diamètre. Il est alors plus commode, pour le calcul, de connaître la résistance correspondant à un fil de diamètre unité (1 millimètre). Le tableau donne cette valeur pour les divers conducteurs.

On considère souvent l'inverse de la résistance d'un conducteur sous le nom de *conductance*. Sa valeur est :

$$C = \frac{1}{R} = \frac{As}{l}$$

Elle s'exprime en une unité spéciale le *mho* (conductance d'un fil ayant une résistance d'un ohm).

La conductance étant l'inverse de la résistance se déduit aussi du tableau ci-après :

MÉTAUX PURS	RÉSISTANCE EN OHMS D'UN FIL d'un mètre de longueur à 0°	
	Section 1 mm² (R_1)	Diamètre 1 mm.
Aluminium	0,0256	0,0326
Argent	0,0147	0,0187
Cuivre	0,0159	0,0203
Etain	0,1305	0,1661
Fer	0,0906	0,1153
Mercure	0,9430	1,2005
Nickel	0,1232	0,1568
Platine	0,0825	0,1050
Plomb	0,2038	0,2594
Zinc	0,0575	0,0732
MÉTAUX ET ALLIAGES INDUSTRIELS		
Acier	0,1580	0,2012
Bronze phosphoreux (h^te conductibilité)	0,0160	0,0204
— — (téléphones)	0,0560	0,0713
Bronze silicieux de	0,0167	0,0213
Bronze silicieux à	0,0780	0,1030
Fer ordinaire	0,1391	0,1770
Ferro-nickel	0,7830	0,9970
Maillechort	0,3000	0,3819
Manganine (Mn-Cu-Ni)	0,4670	0,5911
Mn-Cu-Zn	1,0800	1,3748
Nickeline de	0,3320	0,4354
Nickeline à	0,4480	0,5577

En général, la résistivité croît avec la température et si l'on veut une valeur très exacte de la résistance à $t°$ d'un fil métallique, on doit multiplier la grandeur trouvée et correspondant à 0°, par le facteur $(1 + at)$, a étant un coefficient de température indiqué dans des tables spéciales.

A titre d'exemples, faisons le calcul de la résistance dans deux cas particuliers :

1° Soit un fil télégraphique, en fer, de 4 millimètres de diamètre et de 10 kilomètres de longueur. Le tableau précédent nous donne :

Résistance d'un fil de fer ordinaire d'un mètre de longueur et de diamètre 1 millimètre : 0,177. Dans le cas actuel, la section est 16 fois plus grande que celle d'un fil ayant un millimètre de diamètre, donc on a pour la résistance d'un mètre de ce conducteur : $\frac{0.177}{16}$ et pour celle de 10 kilomètres ou 10.000 mètres :

$$R = \frac{0,177 \times 10000}{16} = 111^{\text{ohms}},11$$

2° Quelle section faut-il donner à un conducteur de cuivre pour qu'il présente une résistance de 3 ohms par kilomètre?

On voit dans le tableau, première colonne, qu'un fil de cuivre de 1 millimètre carré présente, par mètre, une résistance de 0,0159 ohm; par kilomètre nous aurions donc 15,9 ohms; pour réduire cette résistance à 3 ohms, nous devons augmenter la section dans le rapport :

$$\frac{15,9}{3}=5^{mm^2},3.$$

Le cas du cuivre se présentant très fréquemment dans la pratique, nous indiquerons, dans un tableau spécial, les valeurs de la résistance pour diverses sections et divers diamètres :

DIAMÈTRE EN mm	SECTION EN mm²	RÉSISTANCE PAR MÈTRE EN OHMS
0,1	0,0079	2,03420
0,2	0,0314	0,50820
0,3	0,0707	0,22600
0,4	0,1257	0,12710
0,5	0,1963	0,08130
0,6	0,2827	0,05650
0,7	0,3848	0,04150
0,8	0,5027	0,03170
0,9	0,6362	0,02510
1	0,7854	0,02030
2	3,1416	0,00508
3	7,0686	0,00225
4	12,5664	0,00127
5	19,6350	0,00081
6	28,2743	0,00056
7	38,4845	0,00041
8	50,2655	0,00032
9	63,6173	0,00025
10	78,5397	0,00020

Vérification de la loi d'Ohm. — Ohm lui-même a vérifié sa loi. Prenant une pile de résistance connue *r*, il envoyait le courant dans un conducteur de résistance également connue R; l'intensité se calcule par la formule :

$$I=\frac{E}{R+r}$$

On peut alors remplacer le fil par un autre de résistance R'; la nouvelle intensité est :

$$I'=\frac{E}{R'+r}$$

Le rapport de ces deux intensités a donc la valeur *calculée* :

$$\frac{I}{I'} = \frac{R' + r}{R + r}$$

D'autre part, il existe des appareils, que nous étudierons plus tard, les galvanomètres, permettant d'évaluer les intensités. Par l'emploi d'un de ces instruments, on peut obtenir le rapport des *intensités* $\frac{I}{I'}$, et voir si ce résultat expérimental concorde avec la valeur calculée. La loi d'Ohm se trouve vérifiée par cette méthode.

Pouillet, qui a fait en France les études exécutées par Ohm en Allemagne, a pris le cas particulier des piles thermo-électriques; la résistance se réduit alors à celle du fil extérieur seulement et l'on a :

$$\frac{I}{I'} = \frac{R'}{R}$$

On voit par l'expérience que les intensités observées sont sensiblement en raison inverse des résistances employées. Nous pouvons d'ailleurs faire la même opération que Pouillet, mais d'une façon plus commode en employant des accumulateurs électriques dont la résistance intérieure est assez faible pour pouvoir être négligée à côté de la résistance extérieure, si l'on choisit convenablement cette dernière. Nous insérons donc sur le circuit d'une batterie d'accumulateurs un fil de longueur et de section mesurées puis un galvanomètre donnant directement l'intensité en ampères (ampèremètre). Nous observons une intensité I. Doublons ensuite la longueur du conducteur employé dans la première expérience; nous trouvons une intensité I' exactement égale à la moitié de I, ce qui est bien conforme à la loi.

Nous pouvons dans une autre expérience, remplacer le premier conducteur dont le diamètre était d par un autre fil de même nature, mais de diamètre $\frac{d}{2}$. La section de ce nouveau conducteur est donc égale au quart de la section du premier et si les deux fils sont pris de même longueur, nous observons maintenant une intensité $\frac{I}{4}$ comme le veut la loi d'Ohm.

CHAPITRE III

PUISSANCE D'UN COURANT

Effets divers de l'électricité. — L'électricité est capable de produire des effets très variés.

1° Passant dans un fil, elle dégage de la *chaleur*.

2° Cette chaleur peut même être suffisante pour engendrer de la *lumière*.

3° Le passage du courant dans un liquide composé est la cause d'une *décomposition chimique*.

4° Enfin, si les circuits convenablement disposés reçoivent l'électricité, on observe des rotations (réversibilité des dynamos, production de *travail*).

Ainsi la pile ou en général la source est douée d'énergie. Cette énergie, prise sous la forme électrique, se transforme très aisément en chaleur, en lumière, en action chimique, ou en effet mécanique. Nous allons chercher à exprimer la somme d'énergie disponible.

Valeur de la puissance. — La puissance du circuit est le travail produit par seconde et capable d'être transformé. Cette énergie est due à la chute de l'électricité d'un niveau à un autre plus bas.

Appelons E la chute de potentiel subie par l'électricité dans son transport. L'unité de charge produit dans son déplacement un travail mesuré par E, (d'après la définition même du potentiel) et si I est l'intensité du courant, l'énergie disponible toutes les secondes, a pour expression :

$$P = E \times I$$

Quant à I, on le calcule aisément ; en effet, la source de f. e. m. E, donne, dans un fil de résistance R, une intensité égale à :

$$I = \frac{E}{R + r}$$

si r est la résistance intérieure de la pile. Dès lors :

$$(1) \qquad P = E \times \frac{E}{R + r} = \frac{E^2}{R + r},$$

Au lieu d'exprimer P en fonction de E et de $R+r$, on peut se proposer de le faire au moyen de I et des résistances; on a :

$$E = (R + r)\, I$$

d'où :

$$P = (R + r)\, I^2$$

soit :

$$P = \mathfrak{R}\, I^2$$

si on comprend dans le terme $\mathfrak{R}$ toutes les résistances, intérieures et extérieures à la source.

C'est le travail total produit dans le circuit entier. La portion qui est disponible dans le conducteur extérieur, la seule utilisable par conséquent, est :

$$R\, I^2$$

Ces formules supposent l'intensité, la résistance et la force électromotrice exprimées respectivement en ampères, en ohms et en volts. La puissance est alors donnée en une unité correspondante qui est le *watt*. On définit d'ailleurs le watt comme la puissance d'une source donnant un ampère au potentiel d'un volt. Alors en effet $I=1$; $E=1$ et $E\times I=1$.

Connaissant cette puissance, on peut calculer le travail produit pendant un temps t. On y arrive en remarquant que $E \times I$ répond à une seconde; si le déplacement continue pendant le temps t, l'énergie produite devient :

$$E \times I \times t$$

Elle s'exprime en *joules* : le joule est le travail engendré par le coulomb subissant une chute de potentiel égale à un volt ou encore le travail produit en une seconde par un courant de puissance égale à un watt (Le joule est donc un watt-seconde).

Soit en particulier une source de force électromotrice 100 volts donnant un courant de 60 ampères. Sa puissance est :

$$100 \times 60 = 6000 \text{ watts}$$

Le travail disponible toutes les secondes est donc de 6000 joules; pendant un temps t, il égale : $6000 \times t$ joules.

Il peut être quelquefois utile d'exprimer la puissance en fonction du kilogrammètre ou en chevaux-vapeur. Or on verra que :

$$1 \text{ watt} = \frac{1}{9{,}81} \text{ kilogrammètre par seconde.}$$

On en conclut :

$$P = \frac{E \times I}{9{,}81} = \frac{R \times I^2}{9{,}81} \text{ kgm-seconde}$$

On sait que :

$$1 \text{ cheval-vapeur} = 75 \text{ kgm-seconde}$$

donc :

$$P = \frac{E \times I}{9{,}81 \times 75} = \frac{E\,I}{736} \text{ chevaux-vapeur}$$

ou :

$$\frac{RI^2}{736} \text{ chevaux-vapeur.}$$

Dans l'exemple numérique précédent, les 6000 watts nous donnent : 611 kgm.-seconde ou 8,1 chevaux-vapeur.

CHAPITRE IV

COURANTS DÉRIVÉS

Définition. — On appelle *dérivés* plusieurs courants reliant deux points par des chemins différents. Tels sont C C′ C″. Le système trouve son analogue en hydraulique, dans les dérivations qui s'établissent souvent entre deux points d'un fleuve. Il s'agit de déterminer les intensités des courants qui circulent dans chacune des branches.

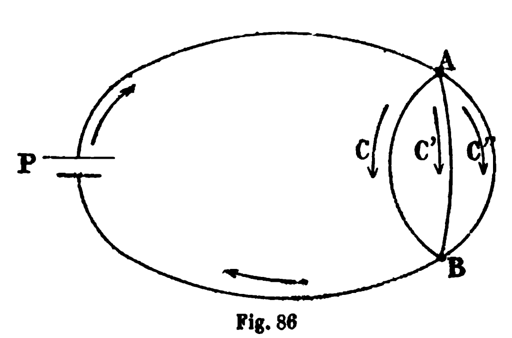


Fig. 86

On y arrive au moyen des deux lois de Kirchhoff.

Lois de Kirchhoff. — I. Considérons quatre conducteurs tous reliés au point A. Les uns amènent de l'électricité; les autres au contraire en emportent, comme les flèches l'indiquent. Appelons i i' i'' i''' les intensités des courants. Il est évident que les charges amenées en A égalent celles qui s'en éloignent et si nous convenons de compter les intensités positivement quand les courants s'approchent de A et négativement dans le cas opposé, nous pouvons énoncer ce principe :

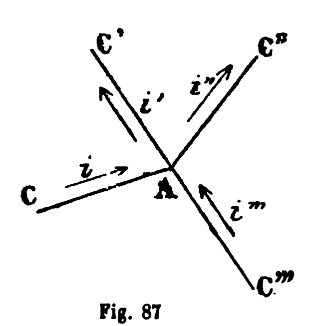


Fig. 87

La somme algébrique des intensités des courants aboutissant à un point quelconque du circuit est égale à zéro.

On écrit :

$$(1) \qquad \Sigma i = o$$

II. Soit maintenant un conducteur fermé ABCDEA (fig. 88). Aux points A,B... aboutissent des fils a A, bB... qui amènent ou enlèvent de l'électricité. Il résulte de cela que l'intensité n'est pas la même dans tous les segments AB, BC... Appelons i_1 i_2... les valeurs diverses de ces intensités et r_1 r_2... les résistances des segments AB, BC... Pour plus de généralité, il peut y avoir dans chacune des branches, des sources de forces électromotrices e_1 e_2...; ces nombres seront comptés avec le signe $+$ ou

avec le signe — selon qu'ils représenteront une chute de potentiel dans le sens de la flèche ou dans le sens opposé. Cela posé, parcourons le circuit fermé en suivant cette flèche et notons les intensités rencontrées i_1 i_2... en suivant, pour le signe, la règle précédente : + pour un courant marchant dans le sens tracé ; — pour un courant opposé.

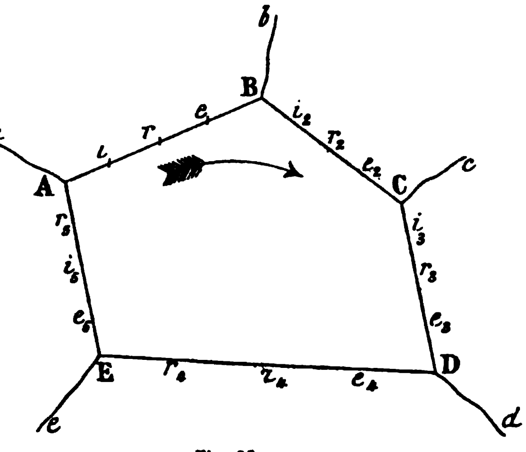


Fig. 88

Avec ces conventions nous allons prouver que :

$$i_1 r_1 + i_2 r_2 + \dots + i_5 r_5 = e_1 + e_2 + \cdot + e_5$$

Pour en faire la démonstration, prenons successivement toutes les parties telles que AB et appliquons à chacune la loi d'Ohm ; nous appellerons V_A V_B ..., les potentiels aux points AB... Nous avons

Dans AB :

$$i_1 = \frac{V_A - V_B + e_1}{r_1}$$

Dans BC :

$$i_2 = \frac{V_B - V_C + e_2}{r_2}$$

. . . .

Dans EA :

$$i_5 = \frac{V_E - V_A + e_5}{r_5}$$

De ces relations nous tirons :

$$i_1 r_1 = V_A - V_B + e_1$$
$$i_2 r_2 = V_B - V_C + e_2$$
. . . .
$$i_5 r_5 = V_E - V_A + e_5$$

Faisant la somme, nous obtenons, en remarquant que les termes V_A V_B ... se détruisent deux à deux :

$$i_1 r_1 + i_2 r_2 + \quad . \quad . \quad . \quad + i_5 r_5 = e_1 + e_2 + \quad . \quad . \quad . \quad + e_5$$

Nous pouvons écrire cette relation sous la forme symbolique :

$$(2) \qquad \Sigma ir = \Sigma e$$

Dans le cas particulier où le conducteur ne renferme aucune pile ou autre producteur d'électricité :

$$\Sigma ir = o$$

Cette loi de Kirchhoff comprend la loi d'Ohm comme cas particulier. En effet,

considérons un circuit de résistance r, comprenant une source de force électromotrice e et traversé par un courant d'intensité i ; la loi des courants dérivés nous donne :

$$ir = e$$

d'où :

$$i = \frac{e}{r} \quad \text{(loi d'Ohm)}$$

Application à un cas simple. — Un cas très souvent réalisé est celui où l'électricité venant d'une source se bifurque entre deux conducteurs. Il s'agit de déterminer dans quelles proportions le courant se partage dans les branches C et D.

Soient i et i' les intensités, r et r' les résistances des deux fils. Nous pouvons, en appliquant la première loi, exprimer que l'intensité totale I, dans la partie extérieure aux dérivations, égale la somme des intensités i et i' :

$$(3) \qquad I = i + i'$$

Soit maintenant le circuit fermé ACBDA, qui ne comprend aucune source électrique ; parcourons-le dans le sens énoncé : nous rencontrons d'abord une intensité à compter positivement i, d'où le terme $i \times r$, puis dans BDA une intensité négative (sens contraire du parcours) soit : $-i'$, d'où le produit : $-i' \times r'$; nous avons donc :

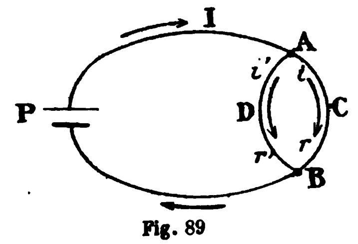


Fig. 89

$$i . r - i' . r' = o$$

ou :

$$i . r = i' . r'$$

qui s'écrit encore :

$$(4) \qquad \frac{i}{i'} = \frac{r'}{r}$$

Ainsi :

Les intensités dans les deux dérivations sont en raison inverse des résistances des deux conducteurs.

Nous pouvons poser au lieu de l'équation (4) :

$$\frac{i}{\frac{1}{r}} = \frac{i'}{\frac{1}{r'}}$$

ou, d'après une propriété connue des proportions :

$$\frac{i}{\frac{1}{r}} = \frac{i'}{\frac{1}{r'}} = \frac{i + i'}{\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}} = \frac{I}{\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}}$$

d'où l'on tire aisément :

$$(5) \qquad i = I \times \frac{r'}{r + r'}$$

$$(6) \qquad i' = I \times \frac{r}{r + r'}$$

Si en particulier le fil C a une résistance r égale à 9 fois celle de D :

$$r = 9\,r'$$

il vient :

$$i = \mathrm{I} \times \frac{r'}{10\,r'} = \frac{1}{10}\,\mathrm{I}$$

$$i' = \mathrm{I} \times \frac{9\,r'}{10\,r'} = \frac{9}{10}\,\mathrm{I}$$

Il passe, dans ce cas, un dixième seulement du courant principal dans le fil C. Nous verrons plus tard que l'on utilise cette disposition dans les galvanomètres.

Résistance des circuits multiples. — Les fils C et D (fig. 89) concourent tous deux au passage de l'électricité du point A au point B. Nous allons nous proposer de calculer la résistance R de cet ensemble, c'est-à-dire celle du fil unique qui donnerait la même chute de potentiel entre les points A et B. Appelons e cette différence de niveau ; si nous envisageons le fil C traversé par le courant i, nous pouvons écrire :

$$e = i\,r$$

de même dans D nous avons :

$$e = i'\,r'$$

Enfin le conducteur unique de résistance R serait traversé par le courant $i + i'$ soit I et l'on a aussi :

$$e = \mathrm{I}\,\mathrm{R}$$

Ainsi nous pouvons écrire :

$$i\,r = i'r' = \mathrm{I}\,\mathrm{R}$$

ou :

$$\frac{i}{\frac{1}{r}} = \frac{i'}{\frac{1}{r'}} = \frac{\mathrm{I}}{\frac{1}{\mathrm{R}}}$$

Utilisons la propriété connue des proportions et nous avons :

$$\frac{\mathrm{I}}{\frac{1}{\mathrm{R}}} = \frac{i + i'}{\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}} = \frac{\mathrm{I}}{\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}}$$

d'où nous tirons immédiatement :

$$\frac{1}{\mathrm{R}} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \qquad (7)$$

Les termes $\frac{1}{\mathrm{R}}$, $\frac{1}{r}$ et $\frac{1}{r'}$ inverses des *résistances* R, r et r' représentent ce qu'on a appelé les *conductances* (page 71). Nous pouvons donc énoncer très simplement le résultat obtenu en disant que :

La conductance d'un système de circuits dérivés est égale à la somme des conductances de chacun des fils.

Ce résultat nous permet de calculer l'intensité I du courant en fonction des résistances des diverses parties. Soit $\mathfrak{R}$ la résistance de la partie BPA, source comprise. Le conducteur total présente alors une résistance :

$$\mathfrak{R} + R$$

et l'on a, si E représente la force électromotrice de la pile :

$$I = \frac{E}{\mathfrak{R} + R} \tag{8}$$

ou encore, en remplaçant R par sa valeur tirée de (7)

$$I = \frac{E}{\mathfrak{R} + \frac{r\,r'}{r + r'}} \tag{9}$$

CHAPITRE V

ACTIONS CALORIFIQUES DU COURANT ÉLECTRIQUE

Loi de Joule. — Le passage d'un courant échauffe toujours les conducteurs et ce dégagement de chaleur est quelquefois suffisant pour produire l'incandescence du fil.

Nous savons que la source donnant un courant d'intensité I sous un voltage E est douée d'une puissance qui a pour valeur :

$$P = E \times I = R I^2,$$

si on désigne par R la résistance totale du circuit. Supposons que le courant n'ait d'autre travail à effectuer que la traversée des conducteurs ; le fil réunit simplement les deux pôles de la source sans rencontrer aucun moteur électrique ni aucune solution qui pourrait être décomposée par l'électricité. Nous assistons alors à une transformation complète de l'énergie électrique en énergie calorifique.

Toutes les secondes, le courant donne un travail : E I. La chaleur engendrée est proportionnelle à cette énergie et nous pouvons facilement l'évaluer.

Nous supposons que E, I et R soient exprimés respectivement en volts, en ampères et en ohms. Alors la puissance est fournie en watts et l'énergie par seconde en joules. Or on sait que :

$$1 \text{ joule} = \frac{1}{9,81} \text{ kilogrammètre}$$

Donc l'énergie disponible toutes les secondes est :

$$\frac{E \times I}{9,81} \text{ kilogrammètres.}$$

Mais, en vertu du principe de l'équivalence de la chaleur et du travail, 1 kilogrammètre se transforme en $\frac{1}{425}$ calorie ; donc on peut dire que la chaleur dégagée, est par seconde :

$$\frac{E \times I}{9,81 \times 425} \text{ calories}$$

ou encore :

$$\frac{R \times I^2}{9,81 \times 425} \text{ calories}$$

Le même raisonnement s'applique du reste à un segment quelconque du conducteur. Entre ses deux extrémités existe une différence de potentiel e d'où une énergie par seconde : $e \times I$ ou $r\ I^2$, en désignant par r la résistance de cette portion de conducteur.

Suivant les cas, on prend l'une ou l'autre des deux expressions de la chaleur dégagée. Pour énoncer la loi, nous choisirons la seconde forme et nous aurons alors :

La quantité de chaleur dégagée pendant l'unité de temps par le passage de l'électricité dans un conducteur est proportionnelle à la résistance du fil et au carré de l'intensité du courant.

Cette loi a été trouvée expérimentalement par Joule. Nous avons vu que le raisonnement y conduit d'ailleurs aisément.

Pour vérifier la loi de Joule, on prend sur un conducteur une certaine longueur de fil que l'on dispose dans un calorimètre. On fait passer le courant pendant quelque temps et on peut dès lors noter, d'après l'élévation de température du liquide, la chaleur dégagée ; on la compare à la chaleur calculée d'après la loi de Joule et l'on constate la concordance des deux résultats.

Température des conducteurs. — Nous connaissons la quantité de chaleur dégagée. Cette chaleur, au commencement de l'opération, s'accumule dans les fils, mais une partie se perd par communication au milieu dans lequel le fil est placé. Si le conducteur augmente de température, c'est tout simplement que la chaleur dégagée dans le fil est supérieure à celle qui est perdue. A un moment donné, la température cesse de monter; il y a alors équilibre entre la chaleur produite et la chaleur perdue; l'expression de cette égalité va nous donner la valeur de la température atteinte, au moins d'une façon approximative, par un fil nu placé dans l'air.

La chaleur produite est :

$$\frac{R\ I^2}{9{,}81 \times 425} = \frac{l\ I^2}{\pi r^2 A \times 9{,}81 \times 425}$$

en désignant par r le rayon du fil, par A sa conductivité et par l sa longueur.

D'autre part, d'après la loi de Newton, la chaleur rayonnée par seconde est proportionnelle à l'excès de la température du fil sur celle de l'enceinte et aussi à la surface de refroidissement, soit $2\pi r l$. On a donc, en écrivant l'égalité indiquée précédemment :

$$\frac{1}{9{,}81 \times 425} \times \frac{l\ I^2}{\pi r^2 A} = 2\,K\,\pi r l t,$$

K étant une constante,

t la différence des températures du fil et de l'air ambiant.

De là nous tirons :

$$t = \frac{1}{2 \times 9{,}81 \times 425\ K\ \pi^2} \times I^2 \times \frac{1}{A} \times \frac{1}{r^3}$$

ou bien, en réunissant tout ce qui est constant dans une quantité invariable C :

$$t = C \times I^2 \times \frac{1}{A} \times \frac{1}{r^3}$$

Ainsi, nous voyons comme conséquences de la formule ci-dessus que :

1° L'échauffement est indépendant de la longueur l du conducteur ;

2° Il varie comme le carré de l'intensité du courant ;

3° Il est en raison inverse du cube du rayon. Les fils fins rougissent donc bien plus vite que les fils d'un certain diamètre ;

4° L'élévation de température au-dessus du degré ambiant est inversement proportionnelle, toutes choses égales d'ailleurs, à la conductivité électrique du corps. Si on a donc deux fils également gros, traversés par le même courant, la température est la plus grande pour le plus mauvais conducteur. Dans la construction des lampes à incandescence, ce principe est fondamental.

Applications du dégagement de chaleur. — La plus ancienne et la plus importante est la lampe à incandescence ; le dégagement calorifique suffit à porter le fil à une température très élevée et la lumière émise comprend toutes les radiations lumineuses ; elle est bien blanche.

Depuis quelques années, on tend à utiliser la chaleur d'une autre manière, soit dans le chauffage des appartements, soit dans la cuisine. On l'emploie aussi pour le travail des métaux dans certains cas spéciaux. Ces diverses applications seront étudiées en détail plus tard.



CHAPITRE VI

ACTIONS CHIMIQUES DU COURANT

Phénomène fondamental. — Faisons plonger dans un liquide composé, dissolution ou corps fondu, deux lames A et B reliées chacune à un pôle d'une source électrique, une pile P par exemple (fig. 90). Nous formons ainsi un circuit comprenant la pile, les fils conducteurs PA et PB, puis la colonne liquide AB. Deux cas sont possibles :

1° L'électricité franchit l'obstacle nouveau interposé mais alors *le liquide est décomposé ;*

2° Le liquide peut former une barrière infranchissable pour l'électricité; le courant se trouve arrêté et le liquide est naturellement inaltéré.

Fig. 90

Ainsi en résumé *si le courant passe dans un liquide composé, on observe une destruction de cette matière.*

Ajoutons que les produits de la décomposition n'apparaissent que sur les lames plongées dans le liquide et jamais dans le bain lui-même.

Cette action chimique se nomme *électrolyse* ; le liquide détruit est l'*électrolyte* ; on réserve le nom d'*électrodes* aux deux lames A et B qui se distinguent en *électrode* +, ou *anode*, reliée au pôle positif de la source et servant à l'entrée du courant, et en *électrode* — ou *cathode* attachée au pôle négatif.

Polarisation des électrodes. — Un courant, qui décompose un électrolyte, emploie une certaine portion de son énergie à ce travail chimique. Sa puissance se trouve donc amoindrie par ce fait et son intensité diminue ; cette intensité n'est plus alors donnée par la loi d'Ohm et il faut, pour obtenir sa nouvelle valeur, retrancher de la force électromotrice un certain nombre qui dépend de la difficulté de l'électrolyse, c'est-à-dire du travail chimique demandé par la décomposition. Cette quantité à soustraire de la force électromotrice joue le même rôle qu'une source opposée à la première. On lui donne le nom de *force contre-électromotrice* ou *force électromotrice de polarisation.* Sa grandeur, nous le répétons, varie d'un électrolyte à un autre. Ce mot de *polarisation* que nous employons, pour caractériser l'état actuel des électrodes, est bien exact, car les deux lames, identiques au début de l'opération, ne le sont

plus quand la décomposition s'est produite : l'une et l'autre se sont recouvertes des produits de la destruction du corps composé ; elles se distinguent maintenant par la nature des dépôts : elles sont *polarisées*.

Nous aurons du reste à revenir plus tard sur ce phénomène de la polarisation et à montrer que cette force contre-électromotrice a une existence réelle : on peut en tirer un courant comme on le ferait d'une force électromotrice ordinaire.

En résumé, supposons que la source du courant ait une force électromotrice E et que la force contre-électromotrice de l'électrolyte donné soit e, la différence est :

$$E - e$$

et le courant résultant prend la valeur :

$$i = \frac{E - e}{R}$$

si l'on désigne par R la résistance du circuit.

On conçoit pourquoi le courant est quelquefois arrêté par un électrolyte : il suffit que sa force électromotrice ne soit pas supérieure à la force électromotrice de polarisation du corps à traverser.

Sens de la décomposition. — Supposons que nous ayons affaire à une dissolution métallique, un sel par exemple, ou encore un acide ou une base. Pour fixer les idées, soit un cas particulier (celui du sulfate de cuivre) ; on met la solution dans une capsule de platine reposant sur une lame en communication avec le pôle — de la source et on fait plonger dans le liquide une feuille de platine reliée au pôle positif. Dès que le courant passe, nous voyons se former un dépôt de cuivre très divisé sur les parois de la capsule.

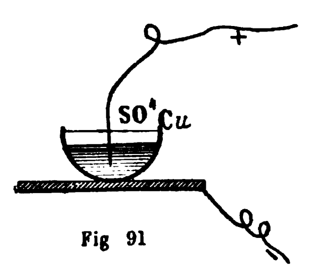


Fig 91

Tous les sels se comportent de même ; ils donnent tous, sauf les complications que nous allons avoir à examiner, un précipité de métal sur l'électrode négative. Le reste du sel va en même temps sur l'autre électrode.

Au lieu d'opérer sur un sel, électrolysons un acide, l'acide sulfurique par exemple ; on voit l'hydrogène se porter à la place du métal. Or on sait que l'hydrogène se comporte chimiquement comme les métaux. L'acide n'est qu'un sel dans lequel le métal est l'hydrogène ; le radical est le même pour un acide et pour un sel.

Nous pourrons donc résumer le sens de la décomposition électrolytique de la manière suivante :

Dans l'électrolyse d'un composé métallique, le métal se rend au pôle négatif ; le radical va sur l'électrode positive.

Nous allons examiner séparément deux cas particuliers, celui de l'eau et celui des bases alcalines.



Décomposition de l'eau. — C'est le premier corps qui ait été décomposé par l'électricité ; l'expérience faite par Carlisle et Nicholson est aussi ancienne que la première pile ; elle date de 1800. On opère dans un petit appareil appelé *voltamètre*, parce qu'il permet de mesurer les courants. C'est un verre percé de deux trous à sa partie inférieure pour le passage de deux fils de platine convenablement mastiqués. Ces fils se prolongent à l'intérieur du vase jusqu'à une certaine hauteur ; au-dehors, ils sont reliés aux pôles de la source (fig. 92).

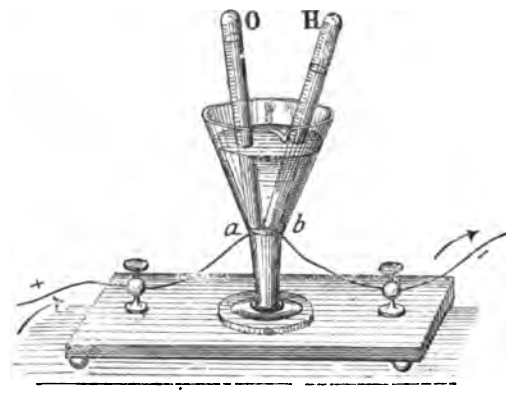


Fig. 92

On met le liquide dans le verre et aussi dans deux éprouvettes graduées qui recouvrent chacune un des fils.

Mais il est à remarquer que l'eau doit être acidulée pour pouvoir être décomposée. On ajoute donc à l'eau une petite proportion d'acide sulfurique et on fait passer le courant ; après quelque temps de passage, le liquide baisse dans les deux cloches et se trouve remplacé par des gaz.

Au pôle négatif, le volume gazeux recueilli est deux fois plus grand qu'au pôle positif : les propriétés des deux gaz nous accusent : à l'électrode — l'hydrogène, à l'autre électrode, l'oxygène.

Nous pouvons donc dire que l'eau s'est décomposée en hydrogène et en oxygène dans la proportion de deux volumes d'hydrogène pour un d'oxygène.

Mais, en réalité, ce n'est pas l'eau elle-même qui se trouve décomposée, c'est l'acide SO^4H^2 qui donne l'hydrogène d'une part et, d'autre part par réaction ultérieure du radical SO^4, de l'oxygène.

Finalement, tout se passe comme si les deux éléments venaient directement de l'eau.

Décomposition des bases alcalines. — Davy, le premier, fit cette expérience qui montra la composition des bases alcalines.

On peut, pour répéter cette opération, mettre un fragment de potasse sur une lame métallique reliée au pôle positif d'une source puissante d'électricité (fig. 93).

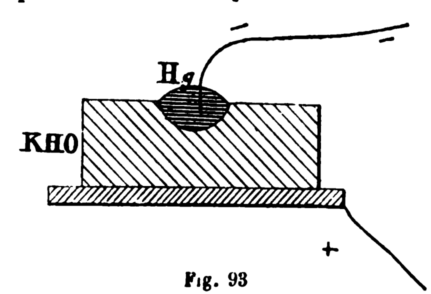


Fig. 93

Le bloc est creusé d'une petite cavité qui reçoit du mercure dans lequel plonge un fil relié au pôle — de la source. Le passage du courant produit un épaississement du mercure en même temps qu'un dégagement gazeux d'oxygène au pôle positif. La potasse s'est donc décomposée, et son métal, le potassium, s'est porté, comme tous les métaux, au pôle —

où il s'est allié au mercure. Cet amalgame peut d'ailleurs être recueilli, puis distillé ; il fournit du potassium.

Actions secondaires. — Nous avons énoncé précédemment la loi générale de l'électrolyse, quant au sens même de l'action. Mais si cette loi est toujours exacte, les corps résultant de l'opération ne restent pas toujours dans le même état ; ils peuvent agir chimiquement soit sur l'électrode, soit sur le liquide qui baigne cette lame. Nous allons examiner successivement deux cas de ces actions dites *secondaires :*

1° Opérons sur le sulfate de cuivre. Seulement nous n'emploierons plus de platine au pôle +. Prenons une cuve pleine de sulfate en dissolution ; faisons plonger dans ce bain un corps conducteur quelconque relié à l'extrémité négative de la pile, et un morceau de cuivre en communication avec le pôle + de la même source (fig. 94).

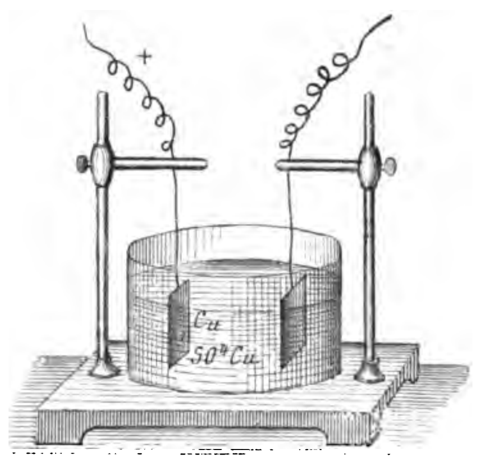


Fig. 94

Le sel SO^4Cu se divise en deux parties : Cu va au pôle — ; le radical SO^4 se porte sur l'électrode positive et rencontre là une lame de cuivre qui se trouve attaquée et qui forme du sulfate de cuivre en quantité juste égale à celle décomposée. Ce sel formé se dissout dans le liquide, qui conserve une concentration constante pendant que la lame positive est rongée et que l'autre se recouvre de cuivre. En somme, en vertu de cette action secondaire, tout se passe comme si le cuivre se transportait simplement d'un pôle à l'autre. On dit alors que la lame + est une *anode soluble*. Cette opération est la base des dépôts métalliques, en galvanoplastie, et de certaines pratiques métallurgiques.

2° Nous allons voir un autre genre d'action secondaire ; soit du sulfate de potassium en solution. L'électrolyse doit libérer du potassium ; mais nous savons, d'autre part, que ce métal agit sur l'eau, suivant la formule :

$$K + H^2O = KHO + H$$

Cette réaction a lieu au contact du liquide qui entoure l'électrode — ; il en résulte de la potasse caustique ; voilà une première action secondaire et il y a en même temps dégagement d'hydrogène.

Le radical SO^4 du sulfate va au pôle + ; il agit aussi sur l'eau de la solution :

$$SO^4 + H^2O = SO^4H^2 + O$$

d'où une production d'acide sulfurique et un dégagement d'oxygène.

Pour faire l'expérience, on prend un tube en U dans les branches duquel plongent deux lames de platine reliées aux pôles de la pile. Les deux branches sont séparées grossièrement par un tampon d'amiante et on colore la solution avec un liquide indicateur tel que le sirop de violettes (fig. 95). Au bout de quelque temps, on voit la liqueur verdir autour de l'électrode —, accusant ainsi la présence d'une base, et rougir de l'autre côté, ce qui est dû à l'acide. En outre, on observe un dégagement gazeux plus abondant du côté négatif qu'au pôle positif.

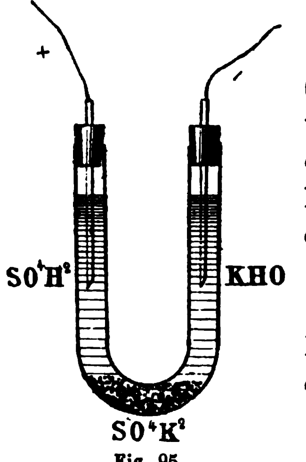


Fig. 95

Lois de l'électrolyse. — Elles ont été trouvées par Faraday et par Becquerel; on peut les résumer dans les trois énoncés suivants :

1° *La quantité d'électrolyte décomposée est la même en tous les points d'un circuit.*

Fig. 96

Nous pouvons mettre les uns à la suite des autres (fig. 96) un certain nombre de voltamètres, tous sur le même circuit, et noter les volumes d'hydrogène dégagés dans chacun d'eux ; nous les trouvons tous égaux, ce qui démontre la loi.

2° *Le poids du corps décomposé est proportionnel à la quantité d'électricité qui a traversé ce corps.*

Nous faisons passer le courant d'une pile à travers un premier voltamètre V puis nous bifurquons le circuit et nous plaçons sur les deux dérivations d'autres voltamètres V' et V'' ; les deux parties du courant rassemblées reviennent ensuite à la pile (fig. 97).

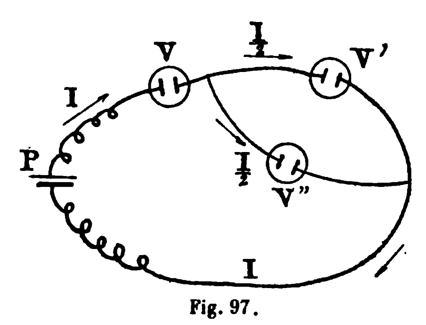


Fig. 97.

D'après cette disposition, et en supposant les deux dérivations identiques, nous voyons qu'il passe dans chaque voltamètre V' et V'' une quantité d'électricité moitié moindre que dans V. Nous laissons passer le courant pendant un temps suffisant et nous constatons ensuite que V' et V'' contiennent des quantités de gaz égales chacune à la moitié de celle qu'on trouve en V. La loi se trouve ainsi vérifiée.

Cette loi a une grande importance car elle nous permet de dire que la quantité de l'électrolyte détruit pendant un temps déterminé est proportionnelle à l'intensité du courant ; d'où un moyen de mesurer cette intensité ; nous y reviendrons dans la partie consacrée aux mesures.

Jusqu'ici nous avons fait agir le courant électrique toujours sur un même corps; supposons maintenant qu'on électrolyse des substances diverses; le même courant pro-

duit alors des effets différents dans les voltamètres contenant ces liquides. La décomposition est réglée par la loi :

3° *Les poids des métaux mis en liberté pendant le même temps s'équivalent chimiquement dans les combinaisons décomposées.*

Soit d'abord un cas très simple : faisons passer le courant à travers un voltamètre à eau acidulée et un tube contenant du chlorure stanneux maintenu en fusion par une lampe. Le pôle positif est constitué par une tige de charbon, non attaquable par le chlore et le pôle — par un fil de platine mastiqué dans le tube (fig. 98). On pèse l'étain déposé sur ce platine et, d'autre part, on évalue le poids d'hydrogène mis en liberté dans le voltamètre à eau. Ces deux poids sont entre eux dans le rapport :

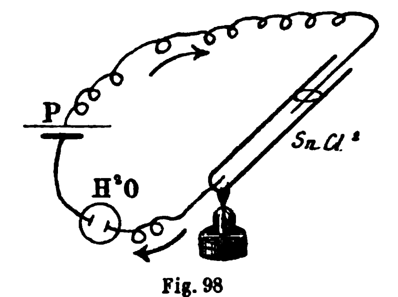


Fig. 98

Hydrogène	1
Etain.	59

Si on remplace le tube à chlorure d'étain par un autre contenant de l'acétate neutre de plomb, on trouve des quantités :

Hydrogène	1
Plomb	103

Les trois métaux : hydrogène, étain et plomb se trouvent donc mis en liberté dans les proportions respectives :

H : 1 Sn : 59 Pb : 103

Ces trois poids sont équivalents chimiquement ; en effet si nous prenons leurs combinaisons avec le chlore par exemple, nous avons les formules chimiques : HCl, $SnCl^2$, $PbCl^2$.

A deux atomes de chlore Cl^2, les métaux combinés sont donc :

2 H (2 H Cl) Sn ($SnCl^2$) Pb ($PbCl^2$)

Or les poids atomiques sont respectivement :

$H = 1$ $Sn = 118$ $Pb = 206$

donc les poids de ces métaux qui s'équivalent vis-à-vis de Cl^2 sont :

$2H = 2$ $Sn = 118$ $Pb = 206$

Ces chiffres sont dans les rapports :

$H = 1$ $Sn = 59$ $Pb = 103$

ce qui vérifie la loi dans le cas choisi.

Mais nous pouvons prendre d'autres combinaisons : du chlorure stannique $SnCl^4$

substitué au chlorure stanneux $Sn\,Cl^2$ ne donne, pendant le même temps, que 29,5 d'étain. Ce poids est bien équivalent de 59 d'étain pris à un sel stanneux ; en effet :

Sn ou 118 est uni à $2 \times 35{,}5$ de Cl dans $Sn\,Cl^2$
Sn ou 118 — $4 \times 35{,}5$ de Cl dans $Sn\,Cl^4$

$$59 = \frac{118}{2} \text{ d' Sn, pris à } Sn\,Cl^2\text{, se combine à } 35{,}5 \text{ Cl}$$

$$29{,}5 = \frac{118}{4} \text{ d' Sn, pris à } Sn\,Cl^4\text{, se combine à } 35{,}5 \text{ Cl}$$

Les poids indiqués s'équivalent donc bien.

On a pu dresser une table des équivalents dits *électro-chimiques* des divers corps. Voici quelques-uns de ces chiffres :

ÉQUIVALENTS ÉLECTRO-CHIMIQUES DE QUELQUES CORPS SIMPLES

Hydrogène	1
Chlore	35, 5
Argent	107, 66
Aluminium	9, 1
Cuivre (à l'état cuivreux)	63, 5
Cuivre (à l'état cuivrique)	31, 75
Etain (à l'état stanneux)	59
Etain (à l'état stannique)	29, 5
Fer (ferreux)	28
Fer (ferrique)	18, 66
Nickel	29
Or	65, 4
Plomb	103
Zinc	33

Le même courant peut donc libérer, pendant le même intervalle de temps, un équivalent électro-chimique de chacun des corps simples, soit 1 d'hydrogène, 107,66 d'argent, etc.

Nous devons nous demander quelle est la fraction de ces équivalents mise en liberté par le courant d'un ampère en une seconde, ou, ce qui revient au même, par une quantité d'électricité égale à 1 coulomb. L'expérience a montré que cette fraction est $\frac{1}{96{,}3}$, l'équivalent étant exprimé en milligrammes. Ainsi, par exemple, un coulomb dégage de leurs combinaisons :

$$\frac{1}{96{,}3} = 0{,}0104 \text{ mg. d'hydrogène,}$$

$$\frac{107{,}66}{96{,}3} = 1{,}118 \text{ mg. d'argent, etc.}$$

En effectuant le calcul pour les corps simples donnés précédemment, nous obtenons le tableau suivant :



POIDS DES CORPS SIMPLES, EN MILLIGRAMMES, LIBÉRÉS PAR 1 COULOMB

Hydrogène	0,0104
Chlore	0,3698
Argent	1,1180
Aluminium	0,0948
Cuivre (cuivreux)	0,6614
Cuivre (cuivrique)	0,3307
Etain (stanneux)	0,6145
Etain (stannique)	0,3072
Fer (ferreux)	0,2916
Fer (ferrique)	0,1944
Nickel	0,3020
Or	0,6812
Plomb	1,0729
Zinc	0,3437

Condition pour qu'une pile décompose un électrolyte. — Nous savons qu'un électrolyte possède une force contre-électromotrice. Si la valeur de cette dernière est inférieure à la différence de potentiel qui engendre le courant, l'électricité n'est pas arrêtée ; nous allons calculer cette force électromotrice de polarisation et nous en déduirons la condition nécessaire pour qu'une pile décompose cet électrolyte.

Prenons comme exemple la décomposition de l'eau :

La chimie nous apprend que, dans la formation d'une molécule de ce corps (soit 18 grammes), la chaleur dégagée est 69 calories.

D'autre part, nous avons vu qu'un coulomb libère $\frac{1}{96,3}$ milligramme d'hydrogène (en décomposant $\frac{9}{96,3}$ milligramme d'eau).

Dès lors le passage d'un coulomb doit donner un travail au moins correspondant à la chaleur nécessaire pour décomposer $\frac{9}{96,3}$ milligramme d'eau. Cette chaleur est:

$$\frac{69}{18.000} \times \frac{9}{96,3} = 34,5 \times \frac{1}{96.300} \text{ calorie.}$$

(Nous mettons à dessein en évidence le nombre 34,5, chaleur de formation correspondant à 1 d'hydrogène, équivalent électro-chimique de ce corps.)

Cette chaleur équivaut à une fraction de kilogrammètre :

$$34,5 \times \frac{425}{96.300} \text{ kilogrammètre.}$$

ou à un nombre de joules :

$$34,5 \times \frac{425 \times 9,81}{96.300} = 34,5 \times 0,0433 \text{ joules.}$$

C'est l'énergie demandée à un coulomb ; cette quantité d'électricité doit pour cela

subir une chute de potentiel exprimée en volts par le même nombre que le travail en joules. En effet :

Travail = Quantité d'électricité × chute de potentiel.

Or la quantité d'électricité est l'unité, donc numériquement :

Travail = chute de potentiel

Nous avons ainsi pour la valeur de la force électromotrice de polarisation :

$$e = 0{,}0433 \times 34{,}5 \text{ volts.}$$

c'est-à-dire en désignant par q la chaleur de formation ;

$$e = 0{,}0433\, q.$$

Dans le cas qui nous occupe :

$$e = 1{,}49 \text{ volt.}$$

Pour décomposer l'eau, il faut donc une pile de force électromotrice au moins égale à $1^v{,}49$. D'une manière générale nous pouvons dire :

La force électromotrice en volts nécessaire à une décomposition donnée s'obtient en multipliant par 0,0433 la chaleur de combinaison du corps.

On a soin de rapporter cette chaleur à la quantité contenant 1 gramme d'hydrogène ou l'équivalent électro-chimique d'un autre corps.

En effectuant le calcul pour quelques cas, on arrive aux résultats :

FORCE ÉLECTROMOTRICE DE POLARISATION

Eau	1,49 volt.
Acide chlorhydrique	0,99 —
Acide sulfurique	1,16 —
Chlorure de Sodium dissous	4,18 —
Chlorure d'Argent	1,27 —
Sulfate de Zinc	2,28 —
Sulfate de Cuivre	1,20 —

CHAPITRE VII

DIVERSES ESPÈCES DE PILES

Polarisation de la pile de Volta. — Nous connaissons déjà ce phénomène de la polarisation dans un voltamètre contenant, par exemple, de l'eau acidulée et deux lames de platine. La pile elle-même est traversée par le courant électrique ; elle doit donc présenter le même phénomène qu'un simple électrolyte.

Et, en effet, il suffit de relier les deux pôles de cette pile aux extrémités d'un galvanomètre à fil peu résistant pour constater une décroissance rapide du courant engendré. Les électromètres et les voltmètres montrent d'ailleurs directement la diminution de force électromotrice.

Le phénomène de la polarisation est accompagné d'un dépôt de bulles d'hydrogène sur le cuivre. Si on parvient à éviter ce dépôt, la polarisation est empêchée. Certains procédés mécaniques y arrivent : on peut former le pôle positif d'une lame de grande dimension à surface grenue ou bien brosser de temps en temps ce pôle de cuivre. Mais pratiquement, c'est par des méthodes chimiques que l'on enlève les produits de la réaction amenant la polarisation de la pile. La matière employée dans ce but est le *dépolarisant*. S'il s'agit d'empêcher la production de l'hydrogène, on emploie soit une substance oxygénée, capable d'être réduite, soit encore une matière chlorée attaquable dans les mêmes conditions.

Emploi du zinc amalgamé. — Dans presque toutes les piles, le métal attaquable est le zinc. Or ce métal est généralement impur et les matières étrangères ont sur sa dissolution dans l'acide une influence remarquable. Le zinc pur n'est attaqué par l'acide sulfurique que si la pile fonctionne ; il ne s'use donc pas inutilement. Au contraire, le zinc du commerce se dissout pendant toute la durée de son immersion. On aurait donc intérêt, au point de vue de la consommation des produits, à faire usage de métal pur plutôt que de celui du commerce. Mais l'expérience a montré que l'amalgamation d'un zinc ordinaire le rend semblable au métal purifié. Cette combinaison avec le mercure est facile à obtenir et peu coûteuse ; elle est toujours adoptée.

Le plus souvent l'amalgamation est seulement superficielle ; elle s'obtient en plongeant les lames dans une solution acide de nitrate de mercure.

Il convient d'ajouter que l'emploi du zinc amalgamé n'est efficace que si l'acide

sulfurique est exempt de produits arsénicaux ; l'acide des pyrites doit donc être absolument proscrit.

Classification des piles. — Le nombre des piles est en quelque sorte indéfini et la classification présente quelque difficulté.

Nous pouvons en faire deux catégories :

1° Piles à un seul liquide ;

2° Piles à deux liquides.

Dans le premier cas, le dépolarisant peut être ou un solide ou un liquide.

Dans le second, il y a un liquide dissolvant, l'autre est le dépolarisant.

Nous n'étudierons qu'un tout petit nombre de piles en raison du peu d'emplois que présentent actuellement ces générateurs d'électricité.

Autant que possible, on indiquera à chaque type les constantes, c'est-à-dire la force électromotrice et la résistance intérieure. Ces deux données suffisent pour caractériser la pile.

Piles Leclanché. — Elles sont du type à un seul liquide, dépolarisant solide. Toutes les piles de cette classe possèdent une dépolarisation lente et en général insuffisante, mais elles servent d'une façon intermittente et quand elles ne sont pas en service, elles peuvent achever leur dépolarisation.

Le liquide actif est le chlorhydrate d'ammoniaque dissous. Une tige de zinc amalgamé plonge dans cette substance et se trouve dissoute, mais seulement pendant le fonctionnement de la pile, suivant la formule :

$$2\,Az\,H^4\,Cl + Zn = Zn\,Cl^2 + 2\,Az\,H^3 + 2\,H.$$

L'hydrogène produit se porte au pôle + où il rencontre le dépolarisant, mélange de bioxyde de manganèse et de charbon; la réduction du corps oxygéné se produit:

$$2\,Mn\,O^2 + 2\,H = Mn^2\,O^3 + H^2\,O.$$

Fig. 99

La pile Leclanché se construit sur trois modèles principaux :

1° Le liquide est contenu dans un vase de verre, de forme carrée et on place le crayon de zinc dans l'un des angles. Dans le bocal plonge le vase poreux rempli d'un mélange de bioxyde de manganèse fin et de charbon ; le pôle + situé au milieu de ce dépolarisant est une lame de charbon des cornues. Ordinairement le vase poreux est fermé, sauf une petite ouverture pour le départ des gaz, au moyen de cire à cacheter.

Eléments : F. é. m. 1,49 volt
Résistance 3 à 4 ohms

2° On a supprimé le vase poreux pour diminuer cette grande résistance intérieure.

Le dépolarisant est aggloméré en deux briquettes situées de chaque côté du charbon +. La baguette de zinc est attachée à l'ensemble des pièces précédentes par des bagues de caoutchouc et on empêche d'ailleurs la communication des deux pôles par l'interposition d'une pièce de terre cuite (fig. 100).



Fig. 100

Constantes de ce couple :

$$E = 1{,}60 \text{ volt}$$
$$R = 1{,}1 \text{ ohm.}$$

3° *Modèle Leclanché-Barbier.* — Le zinc est au milieu du bocal et il est entouré du dépolarisant façonné en un cylindre creux ; il y a dans cet aggloméré du bioxyde de manganèse, du graphite et du brai ; on lui donne la solidité voulue par une vulcanisation au soufre (fig. 101).



Fig. 101

La pile Leclanché est extrêmement répandue pour sonneries, téléphones, etc. Son entretien est presque nul : il consiste simplement, pendant un certain temps, en additions d'eau dans le flacon. Cette pile présente cependant un grand inconvénient : c'est la formation de sels grimpants sur les parois du vase ; l'addition d'un peu de glycérine gêne beaucoup la production de ces sels. D'ailleurs les bords sont ordinairement paraffinés ou vernis dans le même but.

Piles à l'oxyde de cuivre. — Ces piles sont encore à dépolarisant solide ; le zinc est attaqué par une solution de potasse, action qui n'a lieu qu'à circuit fermé :

$$Zn + 2\,KHO = Zn\,O^2\,K^2 + 2\,H.$$

Comme dépolarisant, on fait usage d'oxyde de cuivre disposé au pôle + ; il est réduit suivant la réaction :

$$Cu\,O + 2H = H^2\,O + Cu.$$

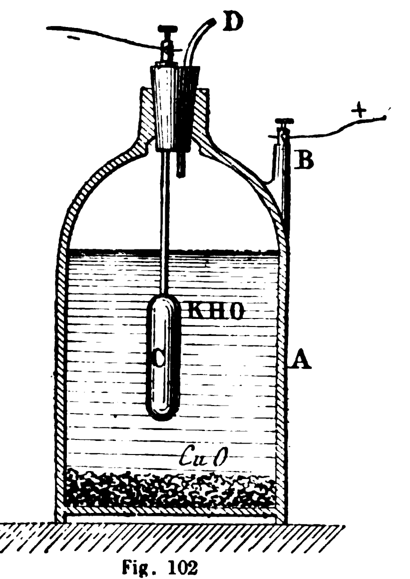


Fig. 102

Cette pile, due à MM. de Lalande et Chaperon, se construit sur plusieurs modèles : Dans sa forme primitive, elle est formée d'un vase de fonte paraffiné ; un tenon B sert de pôle positif à la pile ; il est en communication, par les parois mêmes du flacon, avec la couche d'oxyde de cuivre mise au fond du récipient. La dissolution de potasse à 30 ou 40 % est au-dessus ; elle baigne un cylindre de zinc amalgamé suspendu par une tige de cuivre qui constitue le pôle —. La bouteille est hermétiquement bouchée et l'acide carbonique de l'air n'a pas accès sur la potasse. On a simplement ménagé un tube de caoutchouc fendu D, traversant le bouchon et formant soupape (fig. 102).

Le dernier modèle de cette pile (1897) présente une disposition toute spéciale : il est constitué (pile de Lalande, moyen modèle) par un vase cylindrique en verre contenant une feuille de zinc amalgamé enroulée et suspendue (fig. 103), par un crochet, aux parois mêmes du vase. Le dépolarisant est contenu dans un vase cylindrique en tôle perforée D entouré d'un tissu poreux. Cette sorte de panier occupe le centre de l'élément et il est séparé du zinc par une série de tiges de porcelaine I. Une couche d'huile lourde préserve la solution de potasse du contact de l'acide carbonique de l'air.

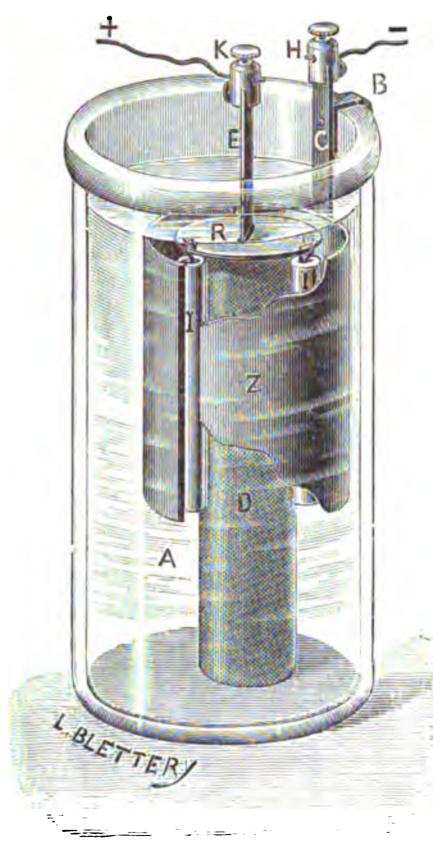


Fig. 103

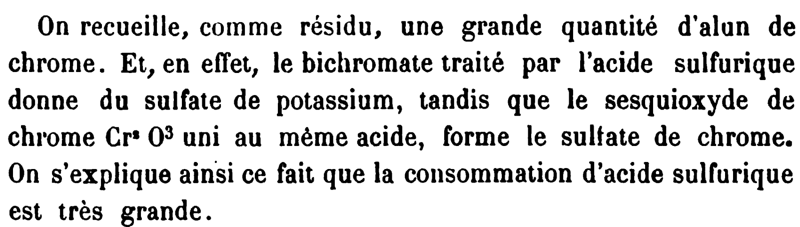
La force électromotrice de la pile à oxyde de cuivre a pour valeur de 0,8 à 0,9 volt mais sa résistance intérieure est très faible (quelques centièmes d'ohm).

Cette pile ne consomme les produits chimiques qu'à circuit fermé ; la dépense est donc proportionnelle à la production d'électricité.

Pile au bichromate. — C'est encore un élément à un seul liquide. Le corps attaquant et le dépolarisant se trouvent réunis dans la même liqueur.

On a une ou plusieurs lames de zinc amalgamé plongeant dans de l'acide sulfurique mélangé d'un bichromate (de potassium ou de sodium). Le mélange libère l'acide chromique, d'où la réduction :

$$2\,CrO^3 + 6\,H = Cr^2O^3 + 3\,H^2O.$$



On recueille, comme résidu, une grande quantité d'alun de chrome. Et, en effet, le bichromate traité par l'acide sulfurique donne du sulfate de potassium, tandis que le sesquioxyde de chrome Cr^2O^3 uni au même acide, forme le sulfate de chrome. On s'explique ainsi ce fait que la consommation d'acide sulfurique est très grande.

Mais l'attaque du zinc par l'acide est toujours dans cette pile considérable, même si l'appareil ne fonctionne pas. On a alors un système destiné à retirer le métal du liquide quand le courant cesse d'être nécessaire. Dans le modèle très répandu sous le nom de pile-bouteille (fig. 104), le zinc est tenu par une tige de cuivre qui peut être serrée au moyen d'une vis, à diverses hauteurs. Quelquefois un treuil permet de donner au métal attaquable le mouvement nécessaire.

Fig. 104

Constantes : E = 1,9 à 2,01 volts,
R, très variable, dépend de la concentration et aussi des dimensions de l'élément. Elle est en moyenne de 0,1 à 0,3 ohm.

Pile Daniell.— Nous arrivons maintenant à l'étude des piles à deux liquides séparés. La plus ancienne porte le nom de Daniell. Elle est formée d'un vase en verre ou en grès au centre duquel se place un vase poreux. L'intervalle annulaire reçoit l'acide sulfurique étendu qui baigne un cylindre fendu de zinc amalgamé.

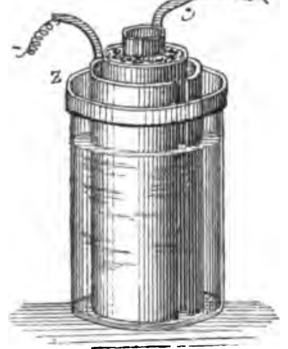


Fig. 105

L'hydrogène, qui résulte de l'attaque du métal, se porte vers le pôle positif constitué par une lame de cuivre mince mise au milieu du vase poreux; il agit ainsi sur une solution de sulfate de cuivre dont on a rempli le récipient intérieur :

$$S\,O^4\,Cu + 2\,H = S\,O^4\,H^2 + Cu.$$

Il en résulte du cuivre que l'on trouve en partie sur le vase poreux, en partie sur la lame +.

La force électromotrice de cet élément est 1,08 volt; elle dépend peu de la température et de l'état des liquides. Mais la résistance intérieure est intimement liée à la concentration; c'est pourquoi on s'arrange en général de manière à maintenir la saturation de la solution cuivrique : pour cela on peut engager dans le vase poreux central le goulot d'un ballon rempli de cristaux de sulfate; un bouchon troué laisse entrer le liquide qui vient se saturer de sel et redescend ensuite.

Quant à la solution sulfurique elle doit être renouvelée de temps en temps.

La pile Daniell présente un inconvénient assez grave : le sulfate de cuivre finit toujours par diffuser à travers le vase poreux; il arrive donc au contact du zinc et se trouve décomposé chimiquement avec dépôt de cuivre. Ce métal peut former, à l'intérieur de la pile, un court-circuit entre le zinc et le cuivre.

Modifications de la pile Daniell. — Elles sont nombreuses; les deux principales, que nous décrirons, sont celles de Callaud et de Meidinger.

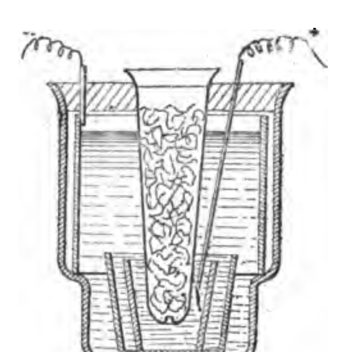


Fig. 106

Dans ces deux éléments, le vase poreux est supprimé et les liquides différents sont simplement séparés par suite de leurs densités inégales ; la résistance intérieure se trouve ainsi diminuée et la diffusion des liquides l'un dans l'autre est également moindre (l'expérience l'a montré).

Dans la pile Callaud (fig. 106) on a, au fond du vase de verre, un cylindre ou une spirale de cuivre soutenus par un fil de même métal isolé par une gaine de gutta ou de caoutchouc. Le zinc est sous la forme d'un anneau qui occupe environ la moitié supérieure du vase.

Pour monter la pile, on commence par mettre de l'eau contenant environ un dixième d'une solution concentrée de sulfate de zinc ; ce liquide est destiné à baigner le zinc ; le sulfate de cuivre est introduit en solution assez concentrée au moyen d'un entonnoir se prolongeant jusqu'au fond du récipient. On entretient facilement le couple en retirant de temps en temps de l'eau et en ajoutant de la solution cuivrique. Il est bon de gratter les zincs après un service de quelques mois.


Fig. 107

La pile Meidinger diffère de celle-là par quelques détails : le cuivre est dans une sorte de gobelet de diamètre inférieur à celui du zinc enroulé et la solution de cuivre est maintenue saturée par une éprouvette à fond percé contenant des cristaux (fig. 107).

Etant données ces deux modifications, les dépôts métalliques qui peuvent se faire sur le zinc et tomber ensuite, n'atteignent pas le cuivre ; de plus la charge de sulfate de cuivre mise dans le tube dispense de recharger l'élément pendant très longtemps.

Ces deux piles, de Callaud et de Meidinger, sont très employées dans les postes télégraphiques.

Pile Bunsen. — Elle ne diffère de l'élément Daniell que par la nature du dépolarisant qui est ici l'acide azotique concentré ; cet acide est placé dans le vase poreux intérieur et on y fait plonger un prisme en charbon aggloméré, destiné à remplacer le cuivre de l'appareil Daniell, pour former le pôle +.

L'idée de l'emploi de l'acide nitrique comme dépolarisant est due à Grove qui prenait une lame de platine comme électrode positive. La réaction dépolarisante est la suivante :

$$2\,Az\,O^3\,H + 2\,H = Az^2\,O^4 + 2\,H^2\,O.$$

L'acide azotique est gaspillé : un tiers seulement de son oxygène sert à la réaction et de plus quand la densité de cet acide est un peu amoindrie, le produit est à remplacer si l'on veut assurer une marche régulière à la pile.

On a trouvé économique de substituer à l'acide azotique un mélange à parties égales de cet acide et d'acide chlorhydrique : la réduction est alors plus profonde.

Fig. 108

Le dégagement gazeux dû à la pile Bunsen oblige à placer cet appareil dans un endroit bien ventilé. C'est encore là un inconvénient de ce couple.

Constantes : E = 1,9 volt environ.
R = 0,1 ohm pour un élément moyen nouvellement monté ; cette grandeur peut d'ailleurs descendre bien au-dessous de ce chiffre.

Cette pile est la plus puissante de toutes celles que nous avons examinées et cela en raison de sa grande force électromotrice et de sa petite résistance intérieure.

Pile de Poggendorff. — L'acide nitrique de la pile Bunsen est remplacé par un mélange de bichromate et d'acide sulfurique capable de fournir de l'acide chromique ; le dégagement des vapeurs rutilantes se trouve ainsi évité et en outre la pile acquiert une plus grande durée.

Généralement le mélange oxydant est constitué comme suit :

Bichromate	100	grammes
Acide sulfurique	50	—
Eau	1.000	—

Constantes : E = 2 volts environ.
R = 0,2 ohm environ ; elle varie d'ailleurs par suite des réactions chimiques.

Lois de l'électrolyse étendues à la pile. — La pile ayant été installée avec soin, les réactions n'ont lieu que si le courant prend naissance. Ces réactions sont encore régies par les lois de Faraday, car l'élément lui-même est un véritable voltamètre ; si nous prenons le couple Volta, le courant intérieur va du pôle zinc au pôle cuivre, et l'hydrogène suit ce mouvement pour se porter sur le cuivre. Or dans un voltamètre, le courant transporte de même le gaz hydrogène vers l'électrode négative qui est le point de sortie de l'électricité.

Toutes les piles sont de même assimilables à des voltamètres chargés de substances diverses. Les lois de l'électrolyse doivent donc s'étendre à l'intérieur des piles. Il n'y a qu'une seule différence ; elle se rapporte au signe de l'énergie en jeu : les réactions des voltamètres absorbent de l'énergie électrique ; celles des piles en produisent.

Nous pourrons alors dire que les poids des corps simples dégagés ou dissous dans la pile sont équivalents aux poids déposés dans les voltamètres.

Soit par exemple une pile Daniell décomposant une matière hydrogénée. Pendant qu'un gramme d'hydrogène se dégage dans le voltamètre, 33 grammes de zinc se dissolvent dans la pile et nous avons en même temps un dépôt de 31,75 grammes de cuivre.

Nous sommes dès lors en mesure de calculer le prix des matières consommées dans la pile. On trouve ainsi, pour la pile Daniell, environ 2 francs par cheval-heure. C'est d'ailleurs là un résultat théorique qui doit être bien augmenté si l'on veut la dépense pratique.

La loi de l'électrolyse appliquée à la pile nous permet aussi de calculer la f. é. m. de l'élément. En effet le travail électrique est dû à la transformation de l'énergie chi-



mique. Or nous connaissons cette énergie d'après la quantité de chaleur qui se dégage dans les réactions. Prenons pour exemple numérique la pile de Daniell; les réactions sont :

1° Dissolution du zinc dans l'acide sulfurique;

2° Réduction du sulfate de cuivre par l'hydrogène.

Supposons l'élément produisant un coulomb; la dissolution du zinc porte alors sur $\frac{33}{96,3}$ milligramme et le dépôt de cuivre sur $\frac{31,75}{96,3}$ milligramme.

Or la chimie nous apprend que :

1° La dissolution de 33 grammes de Zn à l'état de sulfate dégage 54,90 calories ;

2° Le dépôt de 31,75 grammes de Cu par décomposition du sulfate exige 29,60 calories.

La différence : 54,90 — 29,60 = 25,30 calories est donc la chaleur résultante dégagée quand il y a dissolution de 33 grammes de Zn et dépôt de 31,75 de Cu. Lorsque les quantités de ces métaux sont réduites respectivement à $\frac{33}{96,3}$ milligramme de Zn et $\frac{31,75}{96,3}$ de Cu, la chaleur dégagée est :

$$\frac{25,30}{96.300} \text{ calorie.}$$

et le travail équivalent :

$$\frac{25,30}{96.300} \times 425 \text{ kilogrammètre}$$

ou :

$$25,30 \times \frac{425 \times 9,81}{96.300} = 0,0433 \times 25,30 \text{ joule} = 1,09 \text{ joule.}$$

Ainsi, chaque fois qu'un coulomb est produit, la pile crée une énergie de 1,09 joule; la chute de potentiel est donc 1,09 volt, nombre voisin de celui que l'expérience nous donne.

Considération générale sur la pile. — La pile hydroélectrique est un appareil destiné à transformer directement l'énergie chimique en énergie électrique.

Théoriquement, c'est le moyen le plus simple d'obtenir l'électricité. Les machines électriques de l'industrie sont, en effet, entraînées par des moteurs, à vapeur ou autres, qui possèdent l'énergie sous la forme mécanique. Cette énergie, les moteurs la doivent au travail calorifique, si nous envisageons en particulier une machine à vapeur et cette chaleur vient elle-même de l'énergie chimique, combustion du charbon ou d'un gaz ; nous trouvons là deux intermédiaires : chaleur et action mécanique qui n'existent pas dans l'emploi des piles.

Malgré cela l'énergie provenant de cette voie détournée coûte moins cher que celle des piles et cela pour une raison bien simple :

Dans la production de l'énergie par machine à vapeur et par dynamo, la matière première dépensée est le charbon.

Dans les piles, c'est le zinc, l'acide sulfurique et les autres produits. Les prix de ces matières consommées dans les deux cas ne sont pas comparables et malgré les pertes énormes dues aux transformations, l'avantage reste très grand en faveur de la production mécanique de l'électricité.

La différence de prix de revient changerait évidemment de sens si l'on trouvait un moyen de tirer *immédiatement* le courant électrique du charbon ou d'une autre substance aussi commune. L'avantage serait alors au moyen le plus simple et l'*électricité* au lieu d'être produite par l'énergie mécanique *deviendrait la source de toute puissance*. La pile serait alors l'appareil primordial de l'industrie, de l'éclairage, peut-être du chauffage, etc.

Des essais ont été tentés pour la création de cette pile idéale ; l'un des modèles, le générateur électrique Jacques consiste en un vase de fer dans lequel est maintenue de la soude en fusion. Au milieu de la soude plonge un bloc de charbon et l'on fait passer à travers le bain un courant d'air en même temps que le produit est maintenu liquide par un foyer extérieur. Le courant est ainsi engendré par la combustion du charbon, mais on est encore loin de cette production immédiate de l'électricité à laquelle on peut rêver.

CHAPITRE VIII

PILES THERMO-ÉLECTRIQUES

Principe. — Nous connaissons ce principe (voir page 62). Il a été établi par l'expérience de Seebeck.

Le sens du courant est une propriété spécifique de chaque couple et on a pu dresser des listes de métaux telles que le courant aille du métal énoncé le premier au second à travers la soudure chaude ; voici cet ordre :

Bismuth,	Etain,	Fer,
Platine,	Plomb,	Antimoine,
Or,	Zinc,	Tellure.
Cuivre,	Argent,	

Ainsi, par exemple, dans le cas du bismuth associé à l'antimoine, le courant va du bismuth à l'antimoine à travers le point chauffé.

Quant à la valeur même de la force électromotrice développée, elle est généralement petite ; elle dépend de la nature des deux métaux associés et on peut dire qu'entre certaines limites elle est proportionnelle à la différence des températures des deux contacts. Ainsi, en particulier, une inégalité de température de 100° entre le bismuth et l'antimoine engendre $\frac{1}{100}$ volt environ, soit à peu près la centième partie de la f. é. m. d'un élément Daniell. Pour augmenter cette différence de niveau, on doit donc associer un certain nombre d'éléments.

Mais la f. é. m. n'est qu'une des constantes de la pile ; si nous examinons la seconde, c'est-à-dire la résistance, nous avons un résultat qui est tout en faveur des couples thermo-électriques ; en effet l'électricité n'a que des barres métalliques assez grosses à traverser et la résistance présentée est insensible.

La formation des piles thermo-électriques doit reposer sur certains préceptes que nous pouvons dès maintenant résumer :

1° Réunir un grand nombre d'éléments les uns à la suite des autres ;

2° Replier la chaîne de manière à mettre d'un même côté toutes les soudures de rang pair et de l'autre toutes celles de rang impair comme on l'a dit (page 63 et figure 80).

3° Eviter la propagation de la chaleur par conductibilité d'une soudure à la voisine.

Protéger les contacts chauffés de l'action directe du feu qui pourrait les détériorer. Assurer le refroidissement des autres par de larges surfaces épanouies dans l'air et noircies.

Nous ne citerons parmi les piles thermo-électriques destinées à la production du courant que les modèles Clamond et Noé.

Pile Clamond. — Les deux métaux sont : le fer sous forme de lames et l'alliage zinc-antimoine, à proportions égales, façonné en pièces assez semblables à des dents d'engrenage. Ces métaux sont soudés ensemble de manière à former une chaîne circulaire, comme l'indique la figure 109, et le tout est maintenu en place par une couronne de terre réfractaire qui épouse exactement la forme de la chaîne. On superpose un certain nombre de ces plateaux que l'on sépare soigneusement par de l'amiante et l'on réunit électriquement tous les disques.

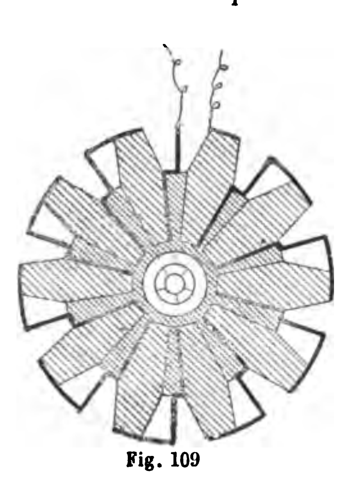


Fig. 109

Fig. 110

Les soudures intérieures se chauffent au moyen d'un brûleur à gaz placé au centre. Une telle pile de six étages, à chacun dix éléments, donne environ 4 volts avec une résistance intérieure de 1,60 ohm. Elle consomme à l'heure 180 litres de gaz en moyenne. On peut d'ailleurs, sans augmenter les frais de chauffage (fig. 110) mettre un plus grand nombre de plateaux et le voltage augmente alors en proportion.

Pile Noé. — Les deux métaux sont ici le maillechort et l'alliage zinc-antimoine; ils sont disposés à peu près comme dans la pile Clamond, de façon à ce que les soudures d'une certaine parité puissent être chauffées par un foyer central. L'action de la chaleur s'exerce par l'intermédiaire de pièces de cuivre et le refroidissement est assuré par des pièces également en cuivre et noircies.

Usages des piles thermo-électriques. — L'énergie que ces éléments développent est toujours peu considérable et il est impossible de l'utiliser pour l'éclairage ou pour les autres usages du même genre. Leur emploi se trouve tout indiqué surtout dans un cas : pour l'analyse chimique par voie électrolytique.

On a beaucoup essayé cependant d'augmenter la puissance de ces générateurs. Un modèle particulier a été créé sous le nom de poêle thermo-électrique Giraud. C'est une colonne formée de 700 éléments avec foyer intérieur au coke: une partie de la chaleur de combustion rayonne au dehors, l'autre se transforme en énergie électrique qui peut donner un éclairage de quelques bougies.

Les piles thermo-électriques servent cependant, mais dans un but tout différent; au lieu de les prendre comme générateurs électriques, on les utilise comme thermoscopes; on a alors divers instruments dont les principaux sont les piles de Melloni, les pinces thermo-électriques, les pyromètres.

Pile de Melloni. — La chaîne des couples thermo-électriques est constituée par des barreaux de bismuth et d'antimoine. Elle est en communication par ses extrémités avec un galvanomètre de faible résistance G, comme l'indique la figure 111. Mais, pour la commodité des opérations, la chaîne est repliée sur elle-même de facon à n'occuper qu'un tout petit espace; l'ensemble est enfermé dans un étui, toutes les soudures impaires d'un côté, toutes celles de rang pair de l'autre et on a soin de protéger les faces de cette pile contre les échauffements extérieurs (fig. 112).

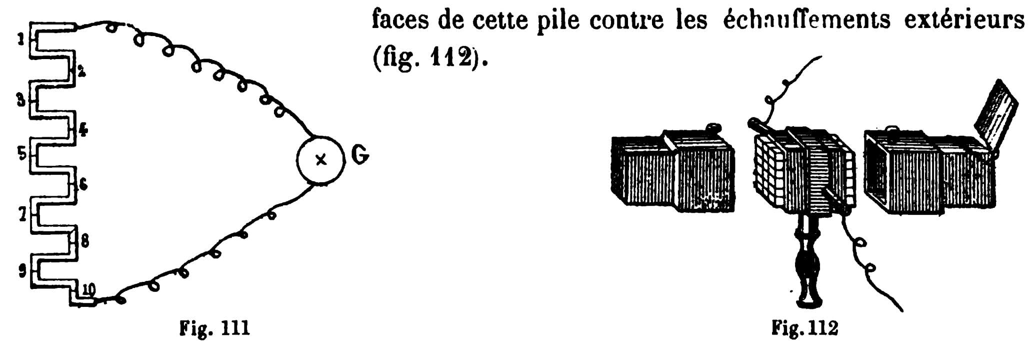


Fig. 111 Fig. 112

Elle sert à mesurer les faibles rayonnements calorifiques et, en effet, si l'on fait tomber sur l'une des extrémités (noircies pour favoriser l'absorption de la chaleur), les radiations d'une source quelconque, une différence s'établit entre les températures des deux ordres de soudures et un courant en résulte; l'instrument est si sensible que la chaleur de la main approchée d'une face suffit à faire dévier le galvanomètre.

Pour l'étude des faisceaux calorifiques de forme allongée (tels sont ceux qui traversent les fentes) on réduit beaucoup l'une des dimensions des faces et l'on a la *pile linéaire*.

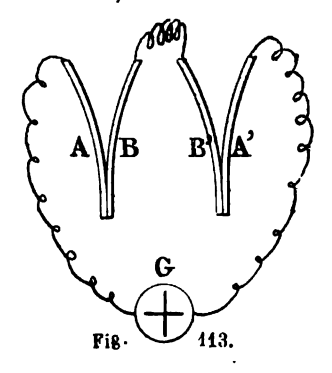


Fig. 113.

Aiguilles thermo-électriques. — Les aiguilles thermo-électriques ne diffèrent de la pile Melloni que par la réduction du nombre des soudures; il y en a deux seulement entre deux fils, l'un de cuivre A, l'autre de fer B. Un galvanomètre est encore intercalé et on enfonce l'une des aiguilles formée par les fils soudés à l'endroit dont on veut connaître la température; l'autre peut être mise dans un liquide, chauffé ou refroidi jusqu'à ramener à zéro la déviation galvanométrique. On lit alors, sur un

thermomètre plongeant dans le bain, la température, qui est celle de la première soudure, et on arrive ainsi à déterminer l'état de chaleur de points inaccessibles au réservoir d'un thermomètre. On peut d'ailleurs graduer le galvanomètre de manière à obtenir, quand la deuxième soudure est maintenue à une température fixe, le degré de l'aiguille chauffée, en fonction de la déviation. Cet appareil trouve surtout son emploi dans les expériences physiologiques.

Pyromètre Le Chatelier. — Il est constitué par un couple platine-platine rhodié qui peut supporter aisément des températures de 1.200°. Il est mis en circuit avec un galvanomètre Deprez-d'Arsonval dont le cadre est en maillechort. Sous l'influence de la température sur l'une des soudures, on obtient un courant électrique qui donne une déviation à l'équipage mobile. La graduation de l'instrument se fait par points : la soudure à chauffer est plongée successivement dans des bains de métaux en fusion et on note les déviations qui correspondent à ces températures connues :

Plomb fondu	325°
Zinc fondu	415°
Soufre bouillant	448°
Aluminium fondu	625°
Argent fondu	945°
Cuivre —	1054°

CHAPITRE IX

GROUPEMENT DES PILES

Divers modes. — Supposons que nous ayons n couples semblables de force électromotrice e et de résistance intérieure r ; on peut les grouper de plusieurs manières :

Fig. 114

1° Relier le pôle + de l'un au pôle — du second, puis l'extrémité + de ce dernier à l'extrémité — du troisième et ainsi de suite. Aux deux bouts de la ligne, il y a deux pôles libres : en avant +, en arrière —.

On dit que les éléments sont groupés *en série* ou *en tension*. Les pôles de la série sont les pôles libres que nous avons indiqués ;

2° Tous les pôles + peuvent être réunis ensemble ; de même les extrémités — de tous les couples. On a ainsi deux barres de connexion sur lesquelles on attache le conducteur extrapolaire. Le mode est dit *en batterie* ou *en quantité* (fig. 115) ;

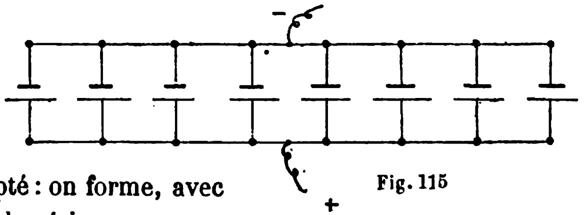


Fig. 115

3° Un système mixte est aussi adopté : on forme, avec tous les couples, un certain nombre de séries contenant chacune le même nombre d'éléments, puis on réunit en quantité ces lignes d'éléments ; les figures 116 et 117 nous montrent six éléments disposés de deux manières différentes : dans la première on a formé deux lignes de chacune trois couples ; dans la seconde chaque ligne a deux couples. Ces séries sont alors au nombre de trois.

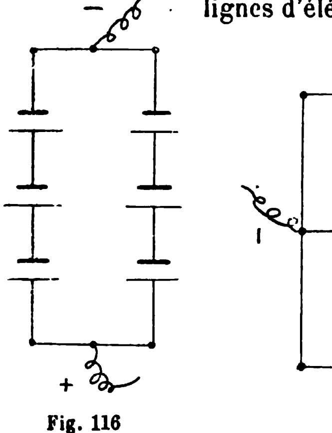


Fig. 116

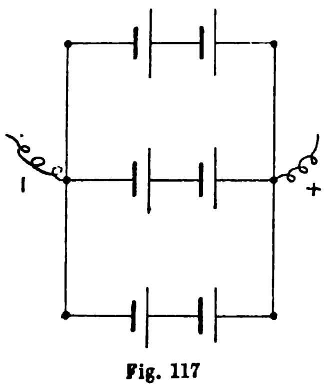


Fig. 117

Nous allons reprendre successivement ces trois modes de montage et voir comment on calcule les éléments de ces groupements de piles.

Piles en tension. — Les couples étant mis bout à bout, on rencontre, si on traverse toute la chaine un accroissement de potentiel égal à e à chaque élément. La f. é. m. E de la série est donc, s'il y a n couples :

$$E = ne$$

Le même courant doit passer successivement à travers tous les couples ; les résistances de tous s'ajoutent donc pour donner un total :

$$R = nr$$

Si nous désirons avoir l'intensité du courant obtenu dans un fil reliant les deux pôles, nous employons la loi d'Ohm, en ayant soin d'ajouter à la résistance intérieure R celle du fil extérieur, soit r' ; nous avons donc :

$$I = \frac{ne}{nr + r'}$$

Deux cas limites peuvent se présenter : ou bien la résistance extérieure r' est très grande, ou bien elle a une très petite valeur :

1° Dans le premier cas, r' très grand, le terme nr a peu d'importance à côté de r'; le dernier peut être seul conservé et nous avons :

$$I = \frac{ne}{r'}$$

Alors l'intensité est proportionnelle au nombre des éléments. *Le groupement en tension est avantageux dans le cas d'un conducteur extérieur très résistant* ; il s'impose dans la télégraphie et la téléphonie.

2° Si, au contraire, la résistance du conducteur est très réduite, ce terme r' s'efface vis-à-vis de nr et il reste :

$$I = \frac{ne}{nr} = \frac{e}{r}$$

L'intensité est celle que donnerait un seul élément ; le mode de groupement en série est donc défectueux quand le conducteur extérieur est de résistance petite.

Piles en quantité. — On réunit d'une part, tous les pôles — et on égalise ainsi leurs potentiels ; d'autre part, tous les pôles +, qui sont par suite au même niveau, sont connectés à leur tour. Il y a donc entre les deux pôles de la batterie une différence de potentiel égale à la force électromotrice de chaque élément, soit e (quand ces deux pôles ne sont pas reliés),

Pour trouver la résistance, remarquons que, par suite des liaisons, tout se passe comme si l'on avait une pile unique de section n fois plus grande que celle d'un élément. Or la résistance varie en raison inverse de la section des conducteurs ; nous pouvons donc poser que la résistance intérieure de la batterie est :

$$\frac{r}{n}$$

(D'ailleurs les n couples mis en dérivation présentent bien (voir page 81), une résistance ρ donnée par la formule :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{n}{r}$$

d'où :

$$\rho = \frac{r}{n}$$

Calculons maintenant l'intensité dans le fil extérieur : soit r' la résistance de ce fil; nous avons :

$$I = \frac{e}{\frac{r}{n} + r'} = \frac{ne}{r + nr'}$$

Discutons :

1° Si la résistance r' est *faible*, le produit nr' peut être négligé à côté de r et l'expression se réduit à :

$$I = \frac{ne}{r}$$

Le débit d'électricité est proportionnel au nombre des couples associés ;

2° Si au contraire r' est fort grand, l'addition de r à nr' ne modifie pas sensiblement le dénominateur et nous pouvons borner l'expression à :

$$I = \frac{ne}{nr'} = \frac{e}{r'}$$

Nous n'avons pas avantage alors à employer beaucoup d'éléments : le résultat obtenu est le même que si nous avions un couple seulement. Dans ce cas nous avons vu d'ailleurs l'avantage du groupement en tension.

Ainsi le *montage en quantité ou en batterie doit être réservé exclusivement au cas d'une ligne très peu résistante.*

Piles en séries parallèles. — Nous savons ce qu'il y a à faire quand le fil est très résistant, groupement en tension, et quand il l'est très peu, groupement en quantité. Nous n'avons plus maintenant qu'à employer le montage mixte dans les cas intermédiaires.

Ce mode de disposition s'appelle ordinairement montage en séries parallèles.

Avec les n couples que nous avons, il est possible de faire p séries de chacune q éléments ($n = pq$). Les pôles sont alors ceux de la batterie ainsi constituée.

La f. é. m. est celle d'une seule ligne soit qe.

La résistance d'une ligne est qr. Celle du montage complet n'est que la p^{e} partie de celle d'une ligne. Elle est donc :

$$\frac{qr}{p}$$

de sorte que l'intensité obtenue dans un fil de résistance r' a pour expression :

$$I = \frac{qe}{\frac{qr}{p} + r'} = \frac{pqe}{qr + pr'} = \frac{ne}{qr + pr'}$$

Le numérateur de cette fraction est constant ; le maximum du quotient correspond donc au minimum du dénominateur ; or ce diviseur est la somme de deux termes dont le produit est constant :

$$qr \times pr' = pq\, rr' = n\, rr'$$

On sait que le minimum a lieu quand les deux nombres ajoutés sont égaux :

$$qr = pr'$$

ou :

$$\frac{qr}{p} = r'.$$

La résistance *intérieure de l'ensemble doit donc égaler celle du fil extérieur* si on veut rendre maxima l'intensité.

Nous avons d'ailleurs un autre moyen d'énoncer le même résultat : nous savons que la chute de potentiel se fait dans les conducteurs proportionnellement aux résistances traversées (voir loi d'Ohm, page 70). Si elle est au total OE (f. é. m. calculée précédemment) avec des résistances : OA pour les piles et AB pour les fils, on voit que la chute du potentiel dans le fil extrapolaire est AA'. Nous venons de voir que l'intensité maxima est atteinte quand OA = AB. Alors $AA' = \frac{OE}{2}$ ce qui nous permet de dire que l'intensité *est maxima quand la chute de potentiel dans le fil extérieur égale la moitié de la force électromotrice*.

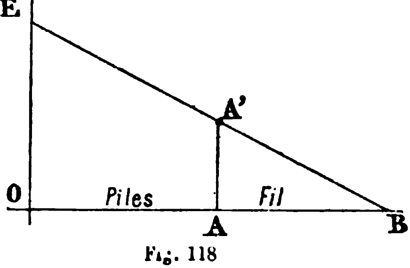


Fig. 118

Dans ces conditions le travail de la pile est d'ailleurs maximum.

Groupement d'un nombre donné d'éléments. — Nous avons vu que le montage à adopter dépend de la résistance du circuit extérieur :

Si cette résistance est très considérable, la disposition en tension s'impose.

Une résistance très petite, au contraire, demande le groupement en quantité.

Enfin, une résistance de grandeur moyenne nous oblige à former plusieurs séries parallèles.

A titre d'exemple, nous supposons que l'on ait 100 éléments Poggendorff à disposer. Nous avons vu :

$$e = 2 \text{ volts}$$
$$r = 0{,}2 \text{ ohm}.$$

Nous devons utiliser le courant dans un fil de cuivre présentant une section de 5 millimètres carrés et une longueur totale de 100 mètres.

La première chose à faire est de calculer la résistance de ce fil. Le tableau de la page 72 nous indique que le fil d'un millimètre carré a, par mètre, une résistance de 0,0159 ohm ; celui de 5 millimètres carrés répond donc à $\frac{0{,}0159}{5} = 0{,}00318$ ohm, 100 mètres ont donc une résistance :

$$r' = 0{,}00318 \times 100 = 0{,}318 \text{ ohm}.$$

Cette valeur n'étant ni très grande ni très petite, nous aurons recours à plusieurs séries mises en parallèle ; soit x le nombre de ces lignes formées chacune de y éléments ; nous avons :

$$(1) \qquad x \times y = 100$$

La résistance de chaque série est :

$$y \times 0,2$$

Celle des x lignes réunies en quantité égale :

$$\frac{y \times 0,2}{x}$$

Cette expression doit égaler, autant que possible, 0,318 résistance extérieure. Posons donc :

$$(2) \qquad \frac{y \times 0,2}{x} = 0,318$$

x et y se tirent du système d'équations (1) et (2).

Résolvant, nous tirons :

$$y = 12,6$$
$$x = 7,9$$

Le montage qui se rapproche le plus de ces chiffres consiste à former des lignes de 13 éléments et à prendre 8 séries semblables. Nous employons alors $8 \times 13 = 104$ éléments et nous avons pour l'ensemble :

$$E = 13 \times 2 = 26 \text{ volts}$$
$$R = \frac{0,2 \times 13}{8} = 0,325 \text{ ohm}$$

alors l'intensité prend la valeur :

$$I = \frac{26}{0,325 + 0,312} = 40,8 \text{ ampères.}$$

Dans ces conditions, la différence de niveau des deux extrémités du fil est :

$$\frac{26 \times 0,325}{0,325 + 0,312} = 13,26 \text{ volts}$$

et la puissance disponible dans le fil a la valeur :

$$13,26 \times 40,8 = 541 \text{ watts.}$$

Nombre d'éléments nécessaires dans divers cas particuliers. — Trois grandeurs : l'intensité, la force électromotrice et la résistance, peuvent intervenir. Nous pouvons nous poser le problème en déterminant deux quelconques de ces trois quantités :

1° E et I 2° E et R 3° I et R



1° *On donne la différence de potentiel et l'intensité.* — Supposons qu'on veuille alimenter un régulateur électrique demandant 10 ampères sous 50 volts. Nous emploierons des piles Bunsen.

$$e = 1,9$$
$$r = 0,1$$

Pour avoir les 50 volts nécessaires, nous devons prendre une batterie capable de développer 100 volts. Chaque ligne devra donc comprendre :

$$\frac{100}{1,9} = 53 \text{ éléments (par excès).}$$

Cette série a une résistance égale à :

$$53 \times 0,1 = 5,3 \text{ ohms.}$$

Nous devons faire plusieurs lignes semblables soit x ; et la résistance de l'ensemble : $\frac{5,3}{x}$ doit égaler à peu près celle de l'arc électrique. Cette dernière vaut, d'après la loi d'Ohm :

$$\frac{50}{10} = 5 \text{ ohms}$$

Donc :

$$\frac{5,3}{x} = 5$$

d'où :

$$x = \frac{5,3}{5} = 1,06.$$

La série unique suffit donc à très peu de chose près.

2° *On fixe la différence de potentiel et la résistance.* — Soit à alimenter 100 lampes à incandescence de 55 volts présentant une résistance de 50 ohms à chaud ; toutes ces lampes sont mises en dérivation entre les bornes de la batterie.

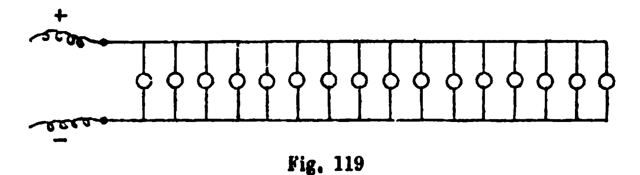


Fig. 119

Nous employons encore les mêmes piles de Bunsen que dans l'exemple précédent. La résistance des 100 lampes réunies est :

$$\frac{50}{100} = 0,5 \text{ ohm.}$$

Il faut donc un ensemble d'éléments présentant à peu près la même résistance et produisant $2 \times 55 = 110$ volts (le double du voltage exigé entre les bornes).

Chaque ligne comprend ainsi :

$$\frac{110}{1,9} = 57,89, \text{ soit 58 éléments}$$

sa résistance est :

$$58 \times 0,1 = 5,8 \text{ ohms}$$

et si nous voulons donner à toute la batterie la résistance 0,5 nous sommes tenus à prendre un nombre x de lignes tel que :

$$\frac{5,8}{x} = 0,5$$

d'où :

$$x = \frac{5,8}{0,5} = 11,6, \qquad \text{soit 12 séries.}$$

Il nous faut donc au total :

$$58 \times 12 = 696 \text{ éléments.}$$

3° *On connaît la résistance et l'intensité.* — Par exemple dans un fil télégraphique en fer de 4 millimètres de diamètre et de 10 kilomètres de longueur, on désire un courant de 0,15 ampère. On emploie dans ce but des éléments Leclanché, modèle primitif : E = 1,4 ; R = 4 ohms.

Calculons d'abord la résistance de la ligne ; le tableau de la page 72 nous indique :

$$\frac{0,1153 \times 10\ 000}{4^2} = 72,06 \text{ ohms.}$$

La chute de potentiel dans la ligne est facile à calculer d'après la valeur de cette résistance ; nous avons, en effet, d'après la loi d'Ohm :

$$\epsilon = I \times R = 0,15 \times 72,06 = 10,8 \text{ volts.}$$

Il nous faut donc une différence de potentiel double, soit :

$$10,8 \times 2 = 21,6 \text{ volts}$$

et pour cela, sur chaque ligne, un nombre de couples égal à :

$$\frac{21,6}{1,4} = 15,42$$

soit pratiquement 16. Si nous appelons x le nombre des lignes semblables, la résistance de l'ensemble est :

$$\frac{16 \times 4}{x} \text{ ohms}$$

et l'intensité du courant est donnée par :

$$I = \frac{16 \times 1,4}{72,06 + \frac{16 \times 4}{x}} = 0,15$$

De là, nous tirons la valeur de x :

$$x = 0,82.$$

Nous prendrons donc une série unique de 16 éléments.

CHAPITRE X

ACCUMULATEURS ELECTRIQUES

Principe. — Certaines piles électriques sont *réversibles*, c'est-à-dire que les produits chimiques nécessaires au fonctionnement de l'appareil, peuvent se reformer par l'action d'un courant électrique sur les résidus des réactions productrices de l'électricité.

Prenons comme exemple la pile à l'oxyde de cuivre (voir page 97) et considérons un élément épuisé. Nous trouvons :

1° Dans la liqueur du zincate de potassium;

2° Au pôle positif du cuivre réduit.

Faisons passer un courant dans cette pile en prenant pour entrée de l'électricité le pôle +; nous décomposons le zincate : le zinc est mis en liberté et se rend sur les lames négatives (en zinc) tandis que l'oxygène se porte au pôle positif sur le cuivre réduit; il en résulte de l'oxyde de cuivre. Quant à la potasse elle reste en solution. De cette manière nous avons après cette opération :

Du zinc déposé,

De l'oxyde de cuivre formé.

Une solution de potasse caustique.

La pile se trouve reconstituée. Elle peut donc de nouveau *produire* un courant comme si nous avions remplacé les produits chimiques épuisés.

L'appareil ainsi obtenu diffère donc d'une pile ordinaire par le mode d'entretien : au lieu de dépenser des matières chimiques, nous consommons de l'énergie électrique. C'est donc une sorte de *réservoir* d'énergie électrique, alors qu'une pile ordinaire est un *transformateur* d'énergie (de la forme chimique à la forme électrique). On donne à ce système le nom d'*accumulateur.*

D'une manière générale nous pouvons dire que les accumulateurs reposent sur le principe de la polarisation des électrodes d'un voltamètre. Nous avons déjà parlé de ce phénomène et nous savons que deux lames de platine, placées dans un vase plein d'eau acidulée et reliées aux bornes d'une source quelconque d'électricité, se recouvrent, l'une d'hydrogène, l'autre d'oxygène. Identiques au début, elles ne le sont plus quand le courant a circulé quelques instants; on obtient en effet deux métaux : platine recouvert d'hydrogène d'un côté, et platine avec oxygène de l'autre. Ces lames diffé-

rentes plongeant dans une liqueur acide sont comparables au zinc et au cuivre d'une pile de Volta : une différence de potentiel doit donc s'établir entre ces lames; elle part de zéro à l'origine du courant et croît peu à peu pour aboutir à une valeur qui se maintient par la suite. Les électrodes sont alors totalement *polarisées*, et un voltmètre relié aux bornes nous accuse très nettement cette différence de niveau croissant jusqu'à un maximum, en faveur de la lame recouverte d'oxygène (c'est-à-dire positive). Ce maximum est la valeur de la *force électromotrice de polarisation*. En vertu de cela, la chute totale de potentiel qui a lieu dans un circuit contenant un voltamètre se divise en trois parties : la première se produit, suivant la loi d'Ohm, dans le fil AB (fig. 120), la seconde, très brusque, s'observe dans le voltamètre, entre B et C et enfin la résistance CD fait encore baisser progressivement le potentiel du point C au point D. Le diagramme (fig. 121) reproduit ces variations.

Fig. 120

Pour atteindre la polarisation totale, nous devons dépenser une certaine quantité d'électricité qui mesure la *capacité de polarisation*. Sa valeur dépend de la grandeur, de la nature et de l'état des électrodes.

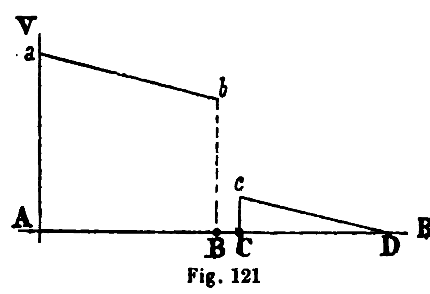


Fig. 121

Les deux lames, étant amenées à des potentiels inégaux se trouvent donc dans les mêmes conditions que les deux métaux d'une pile ordinaire ; elles doivent donner un courant électrique si on les réunit par un fil conducteur après avoir rompu la communication avec la pile. Ce courant marche dans le sens de la chute de potentiel, c'est-à-dire du pôle + à l'électrode — dans le fil extérieur ; on l'appelle *courant secondaire* et pour le mettre en évidence, on doit remplacer, dans l'expérience représentée par la figure 120, la pile par un galvanomètre. Dans le but de comparer le sens de ce courant secondaire au courant primaire employé nous ferons l'expérience suivante :

Une source envoie un courant dans le voltamètre V et dans le galvanomètre G (la déviation de l'aiguille fixe le sens de ce déplacement d'électricité). Au point C est intercalé un commutateur à deux directions, instrument permettant par le simple jeu d'un levier, de changer le circuit à partir du point 1. Actuellement le levier est posé sur 2, ce qui assure au courant la marche indiquée (fig. 122).

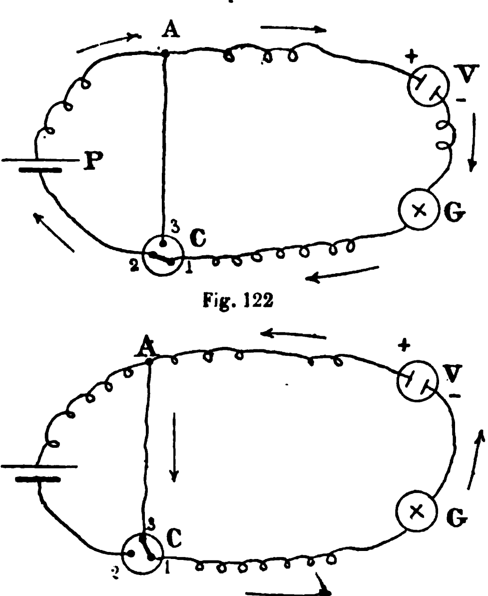


Fig. 122

Fig. 123

Mais la troisième touche de l'instrument, soit 3, est réunie à un point A du circuit et, à un moment donné, quand on juge que la pile a suffisamment agi sur le voltamètre, on établit la communication métallique entre 1 et 3 (fig. 123) ; la pile est mise hors circuit et l'on a une partie fermée comprenant seulement le galvanomètre et le voltamètre. Le courant secondaire se produit et l'aiguille aimantée change brusquement de côté ; elle nous montre un déplacement ayant le sens des flèches, allant du pôle + du voltamètre à l'autre électrode en traversant tout le fil. Ainsi le *courant secondaire* est visible ; il est opposé au *courant primaire* de la pile.

Le *voltamètre polarisé* est donc une véritable pile électrique qui est dite *pile secondaire.*

Quand l'énergie mise en réserve a été dissipée par la production du courant secondaire, l'appareil est revenu à l'état de voltamètre ordinaire, mais on peut lui rendre ses qualités de pile secondaire par un nouveau courant primaire. L'appareil est donc bien réversible et il se comporte alors comme la pile à l'oxyde de cuivre qui nous a servi de type.

Pile à gaz. — Cette pile, due à Grove, est le premier accumulateur imaginé. Elle se compose de deux éprouvettes placées dans un vase, le tout rempli d'eau acidulée pour former voltamètre ; des lames sont suspendues à la partie supérieure des tubes ; elles sont en platine recouvert du même métal pulvérulent, et de grande étendue, de sorte que la capacité de polarisation est ainsi augmentée. On fait donc passer à travers cet élément un courant électrique qui dégage l'hydrogène et l'oxygène, puis on réunit les deux pôles par un fil et on recueille le courant secondaire qui est capable de décomposer l'iodure de potassium. En associant un certain nombre d'éléments, on arrive à électrolyser l'eau et l'on peut constater un fait à l'appui des lois de l'électrolyse : le volume d'hydrogène dégagé de l'eau égale celui qui se combine à l'oxygène dans chacune des piles.

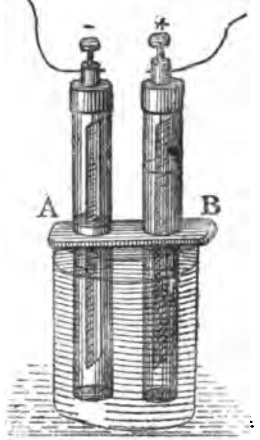


Fig. 121

Il est possible de préparer l'hydrogène et l'oxygène nécessaires autrement que par voie électrolytique ; les méthodes de la chimie nous donnent des gaz qui permettent de monter la pile de Grove, mais alors l'appareil n'est plus un accumulateur; c'est une pile primaire dans laquelle les produits chimiques dépensés sont l'hydrogène et l'oxygène.

Accumulateur Planté. — Le platine, même rendu pulvérulent, ne donne pas une grande capacité de polarisation aux voltamètres. Si on fait marcher quelque temps le courant primaire, on arrive bien vite à la polarisation totale et ce phénomène une fois atteint, la décomposition de l'eau est normale : l'oxygène et l'hydrogène se dégagent autour des lames sans retour possible.

On s'est donc trouvé dans la nécessité de chercher d'autres métaux se prêtant mieux que le platine à la mise en réserve de l'énergie électrique ; l'emploi du platine était d'ailleurs prohibé par le prix élevé de ce métal.

Planté a remarqué le plomb qui possède comme capacité un avantage marqué sur tous les autres métaux usuels et qui de plus fait monter la force électromotrice à 2 volts environ.

Le premier accumulateur pratique de Planté date de 1859. Il consiste en deux lames de plomb, de grande surface, maintenues à une petite distance l'une de l'autre dans l'eau acidulée. Par le passage du courant, le liquide est décomposé ce qui provoque les réactions suivantes :

1° L'hydrogène va au pôle — et agit chimiquement sur la partie grise (oxyde de plomb) qui recouvre toujours la lame. Le produit de l'action chimique est noirâtre ; c'est du plomb métallique très divisé.

$$PbO + 2H = Pb + H^2O$$

Quand l'oxyde est épuisé, l'hydrogène se dégage en pure perte.

2° Au pôle positif se porte l'oxygène qui suroxyde la couche de PbO ; le résultat de l'action est l'oxyde puce de plomb PbO^2 reconnaissable à sa couleur :

$$PbO + O = PbO^2$$

Cette réaction peut, du reste, porter sur une certaine quantité de plomb de cette électrode. Mais quand l'oxygène se dégage au dehors, la polarisation est achevée.

Fig. 125

Alors l'on supprime la source et l'on réunit les deux pôles directement : sous l'influence du courant secondaire, l'hydrogène, qui toujours descend le courant est transporté sur l'électrode +, et l'oxygène qui remonte va sur le pôle — :

1° Au pôle +, l'oxyde puce est réduit :

$$PbO^2 + 2H = PbO + H^2O$$

Cet oxyde provenant de l'opération se trouve naissant au contact de l'acide sulfurique et s'y combine au fur et à mesure en formant du sulfate de plomb ;

2° A l'électrode négative, l'oxygène agit sur le plomb pulvérulent que la charge a produit et le transforme en protoxyde PbO qui devient sulfate.

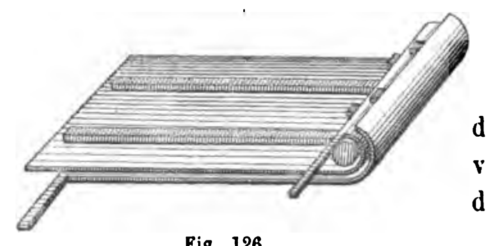


Fig. 126

Le courant secondaire cesse quand le sulfate a fini de se produire sur les deux électrodes, et l'appareil est prêt à recevoir en dépôt une nouvelle somme d'énergie.

Fig. 127

Planté avait donné à son accumulateur une forme spéciale : deux lames de plomb de grande longueur étaient séparées l'une de l'autre par des bandes de caoutchouc puis enroulées ensuite ensemble en

spirale. Chacune portait un prolongement soudé en plomb permettant de la mettre en communication avec la source primaire et le tout plongeait dans un seau de verre rempli d'eau acidulée (fig. 126 et 127).

Cette disposition est défectueuse en ce que des courts-circuits peuvent facilement s'établir entre les deux feuilles : notamment par la chute d'une parcelle solide et il est difficile de faire tomber cette matière interposée, cause de l'accident.

Pour remédier à cet inconvénient, on fractionne les lames en plusieurs parties planes que l'on dispose parallèlement dans un vase à base rectangulaire. Il y a un nombre impair de ces plaques et on les réunit entre elles de deux en deux, comme le montre la figure 128 : le groupe qui contient les deux lames extrêmes forme l'électrode négative ; l'autre constitue le pôle positif. Ce dernier est ordinairement marqué d'un trait rouge par le constructeur. Il résulte de cette description qu'une plaque positive est *toujours* comprise entre deux plaques négatives.

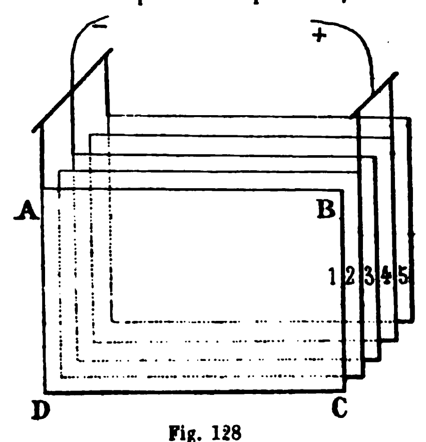


Fig. 128

Pour éviter les courts-circuits pouvant provenir du rapprochement de deux lames voisines, on a soin d'interposer des substances isolantes destinées à maintenir les distances. Ce sont ou des bandes de caoutchouc, ou des baguettes de verre ou encore des pièces de verre ou de porcelaine munies de rainures pour recevoir les plaques.

De plus, on a soin que les lames n'arrivent pas au fond des vases ; de cette manière les corps qui pourraient tomber accidentellement entre les plombs gagneraient la partie inférieure du récipient sans établir de courts-circuits.

Nous avons dit que le plomb offre l'avantage de donner à la capacité une grande valeur relativement aux autres métaux. Mais cette valeur n'est pas encore suffisante pour les usages industriels et l'on doit s'attacher à augmenter la capacité naturelle de l'accumulateur. On y arrive par une opération qui est appelée la *formation*.

Formation des accumulateurs. — Une remarque faite dès les premiers emplois de l'accumulateur Planté a mis sur la voie de la méthode : les appareils devenaient par l'usage de plus en plus actifs ; leur capacité de polarisation augmentait. Au lieu d'attendre de l'usage seul l'amélioration constatée, on eut alors l'idée de les soumettre, après une première charge, à un autre courant contraire au premier et de répéter ensuite, avec des intervalles de repos, ces actions opposées, d'une façon alternée.

Pour rendre compte de l'influence de ces opérations, nous prenons un couple ayant déjà fourni un courant secondaire après une première charge et par conséquent sulfaté sur ses deux lames. Nous réunissons les deux pôles à une source d'électricité pour les charger de nouveau et alors nous observons :

1° Au pôle + une oxydation du sulfate avec production de PbO^2 et mise en liberté d'acide sulfurique.

$$SO^4Pb + O + H^2O = SO^4H^2 + PbO^2$$

Cette action oxydante porte d'ailleurs aussi sur le plomb de la lame elle-même car le sulfate précipité se laisse facilement pénétrer par le gaz. On a donc sur cette plaque plus de peroxyde qu'il n'y en avait après la charge initiale ;

2° A l'électrode —, la réduction du sulfate par l'hydrogène donne du plomb poreux qui met en quelque sorte à nu (grâce à son état pulvérulent) le métal de la lame.

Nous pouvons faire suivre cette charge d'une autre, mais renversée : elle dépolarise notre accumulateur et nous nous retrouvons ensuite comme au début de nos opérations, avec cette différence que les couches de sulfate sont plus épaisses maintenant : la capacité croît donc. Il va sans dire que ces courants de sens alternés doivent être prolongés de plus en plus puisque la quantité d'énergie nécessaire à la polarisation augmente.

Mais cette formation purement électrique est lente ; pour amener la capacité à sa valeur la plus avantageuse, il faut compter sur deux mois de travail, ce qui nécessite une grande dépense de courant. Pour y remédier, on peut, comme Planté, plonger les lames pendant un jour ou deux dans l'acide azotique ; la couche superficielle est rongée et le métal devient plus poreux ; la formation se trouve ainsi beaucoup accélérée.

Formation artificielle des accumulateurs. — La méthode qu'on vient d'exposer a pour but de déposer sur le plomb, d'un côté du plomb pulvérulent, de l'autre de l'oxyde puce, et cela sous une épaisseur assez considérable. Ces dépôts, au lieu de provenir de l'action de l'électricité, sur les plaques peuvent être appliqués artificiellement. Telle a été l'idée de M. Faure (1880). On est arrivé économiquement au résultat en faisant des applications de minium Pb^3O^4 au pôle + et de litharge $Pb\,O$ à l'électrode —. Le passage prolongé d'un courant de charge entrant par les plaques rouges transforme le minium en PbO^2 tandis que la litharge est réduite par l'hydrogène à l'état de plomb métallique. L'appareil est alors prêt à fonctionner.

Quant aux oxydes, ils entrent dans la composition de pâtes spéciales dont on garnit les plaques. Dans les premiers modèles, on empêchait la pâte de se détacher de son support au moyen d'une enveloppe de feutre fortement appliquée contre la matière. Mais ce sac avait l'inconvénient de se détériorer dans l'acide, de sorte que l'adhérence des oxydes à la lame n'était pas durable.

Dans les types d'accumulateurs construits aujourd'hui, on s'arrange de manière à donner plus de solidité à l'ensemble et on y arrive par des moyens très variés.

Charge des accumulateurs. — Les accumulateurs, en tant que piles, peuvent être disposés comme les éléments primaires, c'est-à-dire, suivant les cas : en tension, en quantité ou en séries parallèles.

Selon le voltage dont on dispose, et aussi selon le voltage demandé à la décharge, il peut être indiqué d'effectuer la charge et la décharge de deux manières différentes ; par exemple, on chargera en séries parallèles et on déchargera en tension, ou inversement.

Nous allons supposer que l'opération se fasse sur des éléments montés en tension. Chacun a une force électromotrice de polarisation égale à e et s'il y a n couples, l'ensemble a pour force électromotrice ne.

Le courant de charge devra donc fournir au moins cette différence de potentiel. Voilà une première donnée.

Nous pouvons ensuite nous demander quelle *intensité* il convient d'adopter. D'une manière générale cette intensité doit être proportionnelle à la surface des plaques, c'est-à-dire que la *densité* du courant (intensité rapportée à l'unité de surface des électrodes) doit avoir une valeur déterminée. Or les diverses plaques d'une même fabrication ont ordinairement la même épaisseur quelle que soit leur étendue; il en résulte que le courant de charge doit être proportionné au poids des électrodes qui constituent *un* élément de la série. Chaque constructeur indique d'ailleurs l'intensité qu'il ne faut pas dépasser; ce chiffre varie de 0,5 à 1,5 ampère par kilogramme de plaques En général il vaut mieux rester au-dessous de la valeur fixée.

. Cette intensité du courant de charge est facile à calculer. Soient en effet :

E la différence de potentiel entre les bornes de la machine qui sert à la charge;

e la force électromotrice de polarisation d'un élément;

n le nombre d'éléments;

R la résistance du circuit, accumulateurs compris (la résistance intérieure de ces couples est d'ailleurs assez minime).

Les n éléments ont ensemble une force électromotrice égale à ne ; cette différence de potentiel est de sens opposé à E, et l'on a une différence résultante, en faveur de la machine :

$$E - ne$$

L'intensité du courant a dès lors une valeur :

$$I = \frac{E - ne}{R}$$

On adopte généralement, pour cette charge, deux manières de faire :

1° *Charge à potentiel constant.* — On constate, pendant la charge d'un élément, que la force électromotrice de polarisation va constamment en augmentant; au début la différence de potentiel entre les bornes égale environ 1,9 volt puis elle augmente très vite, atteint le chiffre de 2,1 et se maintient longtemps entre 2,1 et 2,2. Il se produit ensuite, quand on continue l'opération, une augmentation assez brusque qui amène e à 2,5 et même davantage. Il résulte de cela que ne est loin d'être constant. Ce produit augmente beaucoup depuis le commencement jusqu'à la fin de la charge. Pour fixer nos idées, soit une batterie de 60 éléments; au début nous avons pour force électromotrice totale, si nous adoptons le chiffre 1,9 par couple :

$$60 \times 1,9 = 114 \text{ volts.}$$

A la fin de l'opération nous avons de même (avec le chiffre 2,5) :

$$60 \times 2,5 = 150 \text{ volts.}$$

Cela posé, le mode de charge qui nous occupe actuellement consiste à prendre, pendant toute l'opération, une valeur invariable pour E, valeur que l'on maintient constante par le réglage de la dynamo. Dans ces conditions, nous avons au début de la charge, un écart considérable entre E et *ne* et il en résulte que l'intensité I est fort grande, mais *e* augmentant, l'intensité se réduit pour aboutir finalement à une valeur très petite. On peut d'ailleurs étudier expérimentalement cette intensité au moyen d'un ampèremètre inséré sur le circuit des accumulateurs. Le tracé des valeurs de I en fonction des temps correspondants est indiqué (fig. 129). Nous voyons que ce débit

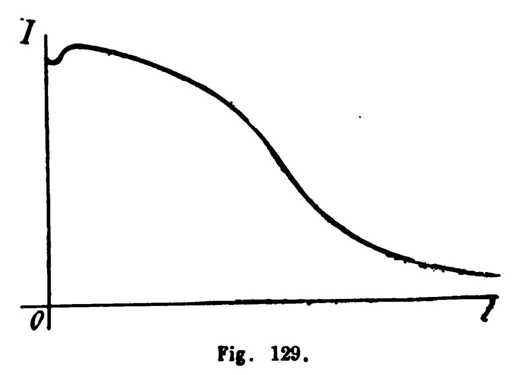


Fig. 129.

tombe brusquement au bout d'un temps très court, mais il remonte bientôt pour reprendre sa valeur initiale, après quoi il subit une décroissance graduelle jusqu'aux environs de zéro si la valeur constante de E a été convenablement établie. Ce mode de charge est rationnel. En effet, au début de la charge, les matières actives sont entièrement prêtes à réagir et le courant peut sans inconvénient être forcé mais à la fin, les actions deviennent plus difficiles et il est bon d'opérer plus lentement. Nous aurons d'ailleurs à discuter plus tard les avantages et les inconvénients de ce mode.

2° *Charge à intensité constante.* — Nous avons établi la relation :

$$I = \frac{E - ne}{R}.$$

Nous voulons que I se maintienne invariable. Or *e* croît comme on l'a dit précédemment; R varie aussi mais d'une quantité peu considérable. Il est donc indiqué

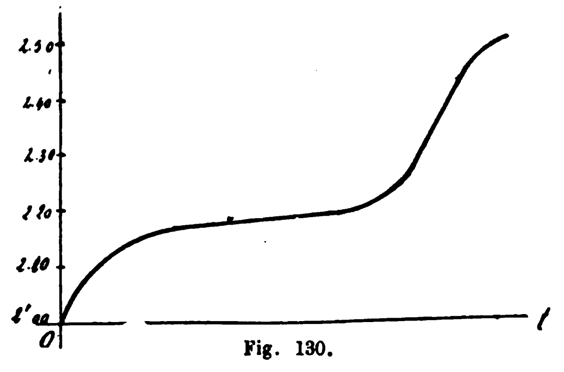


Fig. 130.

de faire augmenter E approximativement de la même quantité que *ne*. On agit dans

ce but sur la dynamo de charge. On a étudié expérimentalement la variation du voltage d'un élément; il faut pour cela un appareil spécial (voltmètre) et l'on trouve que la différence de potentiel va d'abord en croissant rapidement suivant les ordonnées de la courbe (fig. 130); elle se maintient ensuite presque constante aux environs de 2,1 ou 2,2 puis elle subit finalement un accroissement rapide qui la porte à 2,5.

Marche de l'opération. — Il y a deux moyens principaux pour juger la marche de l'opération :

1° *Méthode du voltmètre.* — D'après ce qui a été dit précédemment, nous savons qu'il faut arrêter la charge quand le voltage atteint ou dépasse 2,5 volts par élément. La forme de la courbe de charge permet d'apprécier exactement à quel point on se trouve à un moment donné.

2° *Méthode du densimètre.* — En vertu des réactions qui se produisent pendant la charge, nous savons qu'il se forme une certaine quantité d'acide sulfurique libre. Ce corps se répand dans l'électrolyte dont il augmente la densité d'une façon progressive. Soit par exemple une charge à potentiel constant; on peut déterminer, aux divers instants, les concentrations du liquide et l'on trace ainsi une courbe (fig. 131). On remarque sur ce graphique, un accroissement rapide de la concentration (correspon-

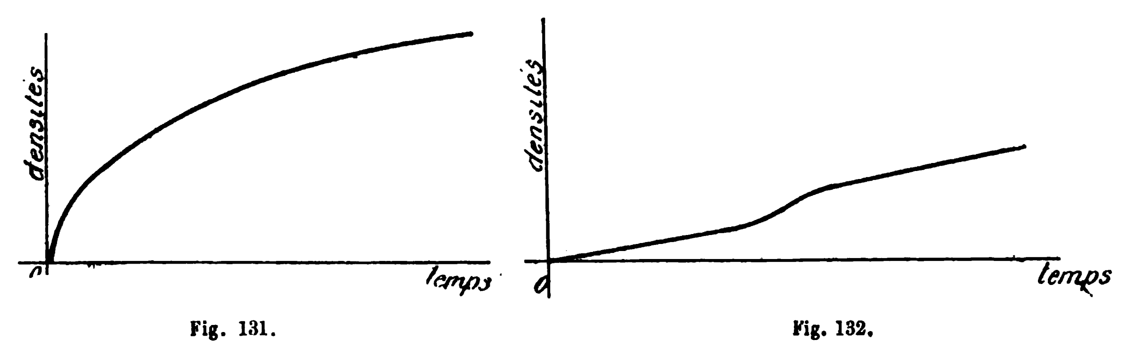


Fig. 131. Fig. 132.

dant à la grande intensité du début puis le degré tend vers un maximum qui est atteint à la charge complète. Dans le mode de charge à intensité invariable, le degré de l'acide croit plus lentement (fig. 132) il est presque proportionnel aux temps écoulés.

Pour suivre cette variation de densité, on fait usage d'aréomètres spéciaux pouvant quelquefois, en raison de leurs petites dimensions, se placer entre deux lames voisines d'un élément. Ces densimètres portent sur leur tige les indications « charge totale », « décharge complète », etc. Un simple flotteur, articulé à un levier coudé, et convenablement lesté, peut donner des indications précieuses par le déplacement d'une aiguille sur un cadran gradué.

La fin de la charge est d'ailleurs accusée par un bouillonnement général des éléments. Ce phénomène est dû au dégagement des gaz oxygène et hydrogène. Mais il ne faut pas prendre pour tel la production de quelques bulles seulement, ce qui peut être dû à un courant trop intense pour les accumulateurs dans leur état actuel. Le

liquide doit être rendu laiteux pour que l'on puisse conclure au dégagement attendu.

Certains ouvriers arrivent d'ailleurs, avec de l'habitude, à reconnaître la fin de la charge, en goûtant le liquide (d'après son acidité).

Décharge des accumulateurs. — A la fin de la charge, les accumulateurs ont un voltage qui égale et peut même dépasser 2,5 volts. Mais dès que la charge est terminée, on voit la différence de niveau baisser très rapidement et tomber à 2,1 environ. Pendant les premiers moments de la décharge, la force électromotrice subit encore une décroissance assez rapide, comme l'indique la figure 133. Longtemps le voltage se maintient au voisinage de 1,9 volt puis une nouvelle décroissance, très lente d'ailleurs, annonce la fin de la décharge. Généralement on ne descend pas au-dessous de 1,85 ou 1,80. Sinon on provoque la formation d'une grande quantité de sulfate qui se détache des plaques en détériorant l'instrument.

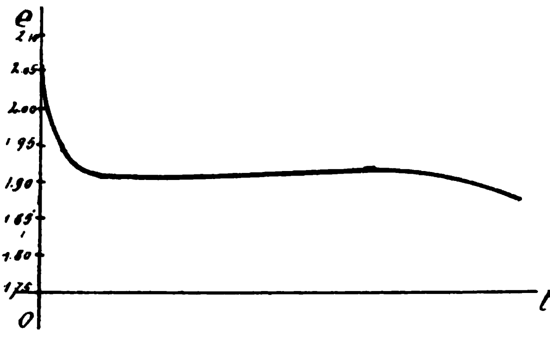


Fig. 133.

Quant à l'intensité de la décharge, elle est réglée par la nature des couples et par leurs surfaces d'électrodes ou leurs poids de plaques. En général cette intensité peut dépasser un peu celle de charge ; admettons les chiffres moyens de 1 à 2 ampères par kilogramme d'électrodes.

Pour observer la fin de la décharge, on sera guidé par les indications du voltmètre ou par celles du densimètre. Les variations de densité pendant cette opération sont en effet les mêmes (en sens contraire) que celles qui ont été observées pendant la charge.

Constantes des accumulateurs. — La valeur d'un accumulateur dépend de bien des facteurs.

En général on se préoccupe peu de la résistance intérieure qui est très petite (voisine de $\frac{1}{10}$ d'ohm par décimètre carré d'électrode positive). Dans les éléments de grande surface, cette résistance intérieure devient donc négligeable à côté de celle des conducteurs extérieurs.

Nous allons maintenant examiner certaines qualités des accumulateurs, soit successivement :

1° La *capacité*, c'est-à-dire la quantité d'électricité disponible ;
2° L'*énergie* dont on peut disposer pendant la décharge ;
3° Les *rendements* ;
4° La *puissance* ;
5° La *durée de la décharge* ;

Capacité des accumulateurs. — La capacité, comme nous le savons deja, est la quantité d'électricité que l'instrument peut nous donner à la décharge. On devrait l'exprimer en coulombs ; mais l'usage qui a prévalu est d'employer comme unité la quantité d'électricité que donnerait un courant d'un ampère marchant une heure. Ce terme de comparaison reçoit le nom d'*ampère-heure*.

On a, en remarquant que le coulomb est un ampère-seconde :

$$\text{Ampère-heure} = 1 \times 60 \times 60 = 3.600 \text{ coulombs.}$$

La capacité est évaluée par le nombre d'ampères-heure du courant de décharge.

Supposons, pour fixer les idées, une série d'éléments fournissant un courant de 50 ampères pendant dix heures ; nous dirons, sans qu'il soit besoin de connaître le nombre de couples, que sa capacité égale :

$$C = 50 \times 10 = 500 \text{ ampères-heure.}$$

En effet, quel que soit le nombre des éléments, chaque couple ne pourra être traversé que par les 500 A-h et la batterie entière aura pour capacité 500 A-h.

Cette constance se rapporte bien entendu à une décharge normale, entre les limites de charge et de décharge que l'on doit toujours respecter; et, pour bien marquer ces conditions, on a l'habitude de dire *capacité utilisable* ou *utile*.

Cette capacité étant proportionnelle à la surface des électrodes ou au poids des plaques, on la rapporte souvent au poids unité. On a alors la *capacité par kilogramme de plaques*.

Ainsi, par exemple, si le couple supposé ci-dessus a une capacité utile de 500 ampères-heure et s'il est formé de 50 kilogrammes de plaques par élément, nous pouvons dire que sa capacité par kilogramme est :

$$c = \frac{500}{50} = 10 \text{ A.-h.}$$

Au lieu de rapporter la capacité de l'accumulateur à un kilogramme de plaques, il est plus rationnel de considérer le poids total de l'instrument (électrolyte, vase, etc., compris). Dans ces conditions, nous diviserons la capacité C de l'élément par le poids p et nous aurons la *capacité spécifique* ou *capacité par kilogramme d'élément*. Dans l'exemple choisi ci-dessus, admettons que le liquide, le vase, etc., pèsent ensemble 25 kilogrammes ; le poids total est 75 et la capacité par kilogramme d'élément prend la valeur :

$$c' = \frac{500}{75} = 6{,}66 \text{ A.-h.}$$

La valeur de la capacité n'est d'ailleurs pas constante pour un élément déterminé. Elle dépend essentiellement du régime de décharge de l'accumulateur de sorte que l'indication de la capacité n'est complète que si on donne en même temps le régime de la décharge.

Pour fixer les idées sur cette relation qui existe entre la capacité et le courant d'utilisation, voici quelques chiffres qui sont des moyennes de résultats obtenus avec divers types d'accumulateurs :

Sous un débit de	10	ampères	à la décharge,	capacité :	80	A.-h.
—	12,5	—	—	—	70	—
—	15	—	—	—	65	—
—	20	—	—	—	50	—

On voit donc que la capacité décroît si nous forçons le courant d'utilisation ou ce qui revient au même, si nous diminuons le temps de cette décharge. Une formule a été indiquée par M. Peukert *(Electrotechnische Zeitschrift*, 1897*)* pour relier ces diverses quantités. Appelons I l'intensité du courant utilisé et t la durée de cette décharge. On a :

$$I^n\, t = \text{constante.}$$

pour un élément donné ; n varie d'un type à l'autre mais pour chacun, il a une valeur bien déterminée. Cette valeur est, pour un élément Tudor 1,40 environ. La connaissance de cette constante de M. Peukert peut être très utile ; elle nous permet de calculer la nouvelle valeur de la capacité d'une batterie si nous sommes amenés à modifier le régime de la décharge.

La capacité est soumise d'ailleurs à d'autres variations encore. Elle n'est pas indépendante du mode de charge que l'on emploie et il est bien constaté que, sous une charge à potentiel constant, une batterie donnée présente une capacité beaucoup plus considérable que celle qu'elle aurait par la charge à intensité invariable. La raison de cette différence doit tenir sans doute à la valeur de l'intensité de la charge, laquelle est proportionnée aux effets à obtenir dans le premier mode (voir page 122) tandis qu'elle est constante dans le second procédé ; il en résulte, dans ce dernier cas, un dégagement abondant de gaz qui oblige de mettre fin à la charge.

Energie utilisable des accumulateurs. — Il n'est pas nécessaire pour évaluer cette énergie de connaître le régime de décharge ; la somme d'électricité disponible nous suffit : c'est la capacité que nous appellerons C. Soit e la forme électromotrice à la décharge (elle est voisine de 2 volts comme nous l'avons vu puisqu'elle varie de 2,1 à 1,8 environ).

Un *coulomb* c'est-à-dire un *ampère-seconde*, subissant cette chute e, produit un travail de *e joules*, autrement dit de *e watts-seconde*. Un *ampère-heure* produira un travail de *e watts-heure* et la quantité totale d'électricité débitée par l'élément, soit de C A-h, fournira une énergie disponible égale à :

$$W = C \times e \text{ watts-heure.}$$



Si la batterie comporte n éléments semblables, nous aurons un total d'énergie donné par l'expression :

$$n\,C\,e \text{ watts-heure.}$$

Soient par exemple 60 éléments du modèle indiqué ($C = 500$ A-h); admettons pour e la valeur moyenne 2 volts ; nous aurons une énergie totale :

$$60 \times 500 \times 2 = 60.000 \text{ watts-heure.}$$
$$= 60 \text{ kilowatts-heure.}$$

Souvent on rapporte au kilogramme de plaques l'énergie disponible des accumulateurs. Soit, par exemple, un type caractérisé par une capacité c par kilogramme d'électrodes ; l'énergie correspondant à un même poids aura pour valeur :

$$w = c \times e$$

Ainsi en particulier avec le modèle supposé précédemment ($c = 10$ A-h) nous avons :

$$w = 10 \times 2 = 20 \text{ w.-h.}$$

par kilogramme de plaques.

Mais ce qui intéresse, surtout quand il s'agit d'automobilisme par exemple, c'est l'énergie comparée au poids total de l'élément autrement dit le travail mis en réserve ou contenu dans un kilogramme d'accumulateur. Ce quotient prend le nom d'*énergie spécifique*. Reprenons les chiffres déjà examinés à titre d'exemple ; nos éléments sont de 500 A-h et leur poids total de 75 kilogrammes ; il vient alors pour l'*énergie spécifique* (si $e = 2$ volts) :

$$\frac{500 \times 2}{75} = 13{,}33 \text{ w.-h.}$$

par kilogramme d'accumulateurs.

La question peut d'ailleurs se poser d'une manière différente : quel poids d'accumulateurs faut-il employer si l'on veut mettre en réserve une énergie donnée, soit un kilowatt-heure. Nous connaissons l'énergie contenue dans un kilogramme ; il nous sera donc facile de calculer le poids cherché. Dans l'exemple précédent ce poids est :

$$\frac{1000}{13.33} = 75 \text{ kilogrammes.}$$

L'énergie spécifique d'une batterie n'est pas d'ailleurs une quantité constante ; elle dépend, comme la capacité du reste, de la rapidité de la décharge et aussi du mode de charge.

1° *Influence du régime de décharge.* — Si le débit demandé à la batterie augmente on fait décroître l'énergie. Voici, à l'appui de cette proposition, des chiffres obtenus, au concours des fiacres automobiles, sur un accumulateur *Fulmen* :

Au régime de	1,25	ampère	par kg,	l'énergie	spécifique	égale	30	w.-h
—	2,5	—	—	—	—		26	—
—	5	—	—	—	—		20	—



Autrement dit :

Au régime de	1,25 A,	le poids	d'accumulateurs	est de	33,33 kg	par Kw.-h.
—	2,50 —	—	—		38,46	—
—	5 —	—	—		50	—

M. Hospitalier énonce ce fait en disant : « ce que l'on gagne en intensité ou en puissance, on le perd en énergie ».

2° *Influence de la charge.* — Elle découle immédiatement de la variation constatée pour la capacité. Le mode de charge à potentiel constant l'emporte beaucoup sur le procédé à intensité invariable.

Rendements des accumulateurs. — La question peut être envisagée de deux manières différentes :

1° Admettons la charge et la décharge faites avec le même montage des éléments. Nous confions aux accumulateurs une certaine quantité d'électricité ; nous en retirons, par la décharge, une autre quantité (forcément moindre que la première ; c'est la capacité utilisable). Nous pouvons comparer la quantité restituée à la quantité dépensée et nous avons alors le *rendement en quantité*.

2° La charge a nécessité la dépense d'une somme donnée d'énergie ; une partie de ce travail est rendue disponible par la décharge (nous l'avons calculée précédemment). Il est intéressant de comparer la somme recueillie à la somme dépensée et nous obtenons ainsi le *rendement en énergie*.

Nous allons évaluer successivement ces deux rapports :

1° *Rendement en énergie*. — Nous avons appelé C la capacité de l'accumulateur, c'est-à-dire la quantité d'électricité recueillie pendant la décharge. Soit aussi C' l'électricité consommée par la charge. Le rendement en quantité s'exprime par :

$$R_q = \frac{C}{C'}$$

Ce quotient dépend d'un certain nombre de circonstances. Il varie notamment avec l'intervalle de temps qui sépare la charge de la décharge. Il n'est pas non plus indépendant du mode de charge adopté ; la charge à intensité constante présente, à ce point de vue, un léger avantage sur le procédé à tension invariable. Le maximum de rendement en quantité paraît être de 95 à 96 %.

2° *Rendement en énergie.* — Nous avons déjà exprimé le travail disponible pendant la décharge ; c'est :

$$W = Ce$$

par élément en appelant e la f. é. m. pendant l'utilisation du courant ; soit de même e' la tension moyenne de la charge (cette valeur est supérieure à e, comme on l'a vu) ; C' étant la charge dépensée, nous avons pour l'énergie utilisée à la charge :

$$W' = C'e'$$

et le rendement en énergie a pour expression :

$$R_w = \frac{W}{W'} = \frac{Ce}{C'e'} = \frac{C}{C'} \times \frac{e}{e'}$$

Le facteur $\frac{C}{C'}$ est le rendement en quantité ; $\frac{e}{e'}$ est une fraction ; d'où nous concluons que :

$$R_w < R_q$$

Quant à la valeur du quotient $\frac{e}{e'}$, elle varie beaucoup avec le mode de charge adopté. Elle est, dans la charge à débit constant, bien plus grande que dans l'autre mode, ce qui accentue l'avantage, à ce point de vue spécial, du procédé à intensité invariable. Cet avantage peut se chiffrer par 10 % environ. Le maximum de ce rendement paraît être dans les meilleures conditions possibles de 84 à 86 °/₀.

Il est d'ailleurs assez important en général de ne pas faire travailler la batterie sous un trop fort rendement.

Puissance des accumulateurs. — Nous connaissons l'énergie totale disponible mais nous n'avons pas encore calculé le *travail qui peut être demandé par unité de temps* aux accumulateurs. Cette *énergie donnée par un élément pendant une seconde* est la *puissance* du couple secondaire. Elle dépend de l'intensité de la décharge. Soient I cette intensité et e la tension ; la puissance disponible est :

$$P = eI \text{ watts.}$$

par élément. Souvent on la rapporte au kilogramme de plaques et l'on a ainsi :

$$p = ei \text{ watts}$$

si l'on désigne par i l'intensité de décharge par kilogramme d'électrodes. En moyenne i vaut 1,5 ampère ; e vaut environ 2 volts, donc :

$$p = 2 \times 1{,}5 = 3 \text{ watts}$$

Or, nous savons que le cheval-vapeur équivaut à 736 watts ; pour obtenir cette puissance d'un cheval, nous devons donc employer un poids de lames égal à :

$$\frac{736}{3} = 245{,}3 \text{kg.}$$

On peut évidemment obtenir cette puissance, soit en multipliant le nombre de couples, soit en augmentant le poids des plaques de chaque élément. Le premier moyen accroît la f. é. m. de la batterie, le second permet d'augmenter l'intensité de la décharge.

Reprenons l'ensemble de la batterie déjà employée. Nous disposons de 60 couples contenant chacun 50 kilogrammes de plaques. L'intensité du courant d'utilisation sera, à raison de 1,5 par kilogramme.

$$50 \times 1{,}5 = 75 \text{ Ampères}$$

Le voltage, en comptant 2 volts par élément, a pour valeur :

$$60 \times 2 = 120 \text{ volts}$$

La puissance est dès lors :

$$P = E \times I = 120 \times 75 = 9000 \text{ watts}$$
$$= 9 \text{ kilowatts}$$

ou encore :

$$P = \frac{9000}{736} = 12,22 \text{ chevaux-vapeur.}$$

Il est plus rationnel, pour la puissance, comme pour les autres constantes, de comparer la grandeur de cette puissance non pas au poids des plaques mais au poids total des accumulateurs. On a alors la *puissance spécifique*. Cette grandeur s'évalue aisément car il suffit de diviser la puissance totale de l'élément par le poids du couple complet. Soit d'ailleurs i le *débit spécifique* c'est-à-dire l'intensité de charge rapportée à un kilogramme d'accumulateur ; le voltage étant e, nous avons pour *puissance spécifique* :

$$p' = e\,i'$$

Admettons que i' vaille 1 ampère et e 2 volts ; il vient :

$$p' = 1 \times 2 = 2 \text{ watts}$$

par kilogramme d'accumulateurs.

Dans ces conditions il faut compter, avec ces éléments, pour produire la puissance d'un cheval-vapeur, sur un poids d'accumulateurs égal à :

$$\frac{736}{2} = 368 \text{ kilogrammes.}$$

Pour un kilowatt il faut de même :

$$\frac{1000}{2} = 500 \text{ kilogrammes.}$$

Il est bien entendu que cette puissance est essentiellement variable ; nous pouvons faire débiter à la batterie des courants d'intensités très diverses et par suite modifier notablement la puissance disponible ; mais comme nous l'avons vu (page 126) si nous augmentons le débit et par conséquent la puissance, nous faisons décroître la capacité et en même temps l'énergie disponible des accumulateurs. Reprenons encore le cas des Fulmen cités déjà :

Avec une puissance	spécifique de	2,5	watts, l'énergie	spécifique est	30	w.-h.
—	—	5	—	—	26	—
—	—	10	—	—	20	—

Autrement dit, supposons qu'il s'agisse de développer une puissance de 1 kilowatt :

Au régime de	2,5	watts	par kg il faut	400 kg,	capables	de donner	12	Kw-h.
—	5	—	—	200	—	—	5,1	—
—	10	—	—	100	—	—	2	—

On doit donc, suivant les cas, sacrifier ou la puissance ou l'énergie. On perd en énergie ce que l'on gagne en puissance et réciproquement.

Durée de la décharge. — Elle dépend évidemment de la capacité et du régime de décharge. Soient c la capacité en ampères-heure et I l'intensité du courant en



ampères. La quantité d'électricité récupérée est égale au produit de l'intensité par la durée t de l'opération. On a donc :

$$C = I \times t$$

d'où nous tirons :

$$t = \frac{C}{I}$$

La batterie qui nous a servi de type avait une capacité C de 500 A-h ; nous avons admis un courant de 75 A ; donc la durée est :

$$t = \frac{500}{75} = 6 \text{ heures } 40 \text{ minutes.}$$

Suivant les besoins, on est amené à certains moments, à dépasser la valeur fixée pour l'intensité. Dans ce cas, la durée de la décharge se trouve diminuée et cela indépendamment des variations qui résultent pour la capacité de cette marche forcée.

Comparaison des deux modes de charge. — Nous avons dit qu'il existe deux modes de charge principaux pour les accumulateurs : à voltage constant ou à intensité constante. Nous pouvons maintenant discuter la valeur de ces deux procédés.

Le mode à tension invariable est avantageux aux points de vue de :

1° La rapidité de la charge.

2° La capacité utilisable.

3° La constance de la force électromotrice, à la décharge.

Le procédé à intensité constante est inférieur au premier sur les trois points indiqués mais il présente une supériorité si on envisage le rendement en quantité et surtout le rendement en énergie.

Différentes espèces d'accumulateurs. — Les systèmes adoptés sont très nombreux ; nous n'en indiquerons qu'un petit nombre.

Dans chaque type, se construisent des éléments de dimensions très variables. Pour les petits modèles les vases de verre sont tout indiqués. Les éléments de grande dimensions sont logés dans des caisses de bois revêtues intérieurement de lames de plomb.

Quant aux modèles transportables, ils sont munis de vases d'ébonite.

On peut diviser les accumulateurs en plusieurs groupes :

1° Appareils à formation purement électrolytique, genre Planté par conséquent.

2° Eléments à oxydes rapportés.

3° Eléments mixtes, comprenant des plaques + genre Planté et des lames — genre Faure.

Parmi les accumulateurs genre Planté, nous signalerons les types *Blot* et *Pulvis* très répandus.

Accumulateur Blot. — C'est une modification du type Planté, mais disposée de manière à augmenter le plus possible la surface active et à empêcher toute déformation des plaques. Ces plaques sont constituées de la manière suivante :

Sur une navette en plomb antimonié, sont enroulées deux lames de plomb, l'une

gaufrée, l'autre également gaufrée présente en plus de nombreuses stries, le tout dans le but d'augmenter la surface agissante. La navette ainsi recouverte est coupée en deux par une section transversale et on réunit un certain nombre de demi-navettes semblables pour former une plaque; cette lame est d'ailleurs enchâssée dans un cadre de plomb antimonié, mais les navettes ne sont soudées qu'à la partie supérieure. De cette manière les éléments des plaques sont libres de se dilater et il n'y a aucune déformation comme dans le cas des électrodes rigides (fig. 134).

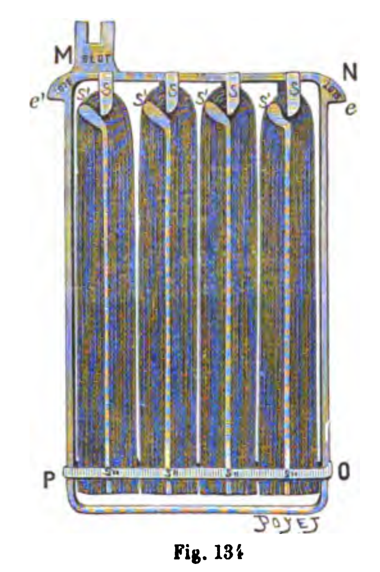


Fig. 134



Fig. 135

Les diverses lames sont suspendues par l'intermédiaire de bandes de verre à l'intérieur du récipient (fig. 135). La capacité de cet élément est assez considérable.

La disposition particulière des plaques permet à l'instrument de supporter aisément des courts-circuits. Le régime normal de décharge peut varier de 1 à 5 ampères par kilogramme de plaques.

Accumulateur Pulvis.— Il est basé sur l'emploi de la poudre très fine de plomb pur mélangée d'une matière inerte très poreuse (la pierre ponce). Les plaques qui supportent la poudre sont en plomb et creusées de rainures profondes dans lesquelles est logé le mélange qui fait intimement corps avec le support. En raison de cette disposition l'électrolyte pénètre profondément dans la masse; le travail chimique est très complet et par suite la capacité spécifique considérable.

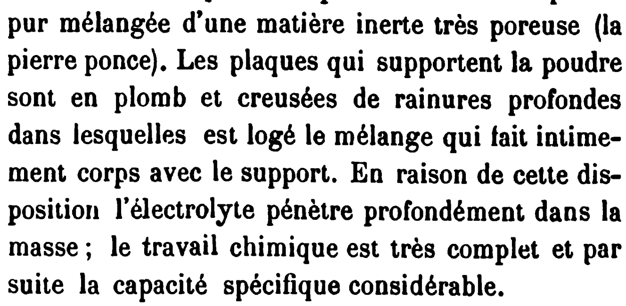


Fig. 136

Chaque plaque est constituée par un certain nombre de rubans obtenus par refoulement du plomb à la presse hydraulique à travers une filière de forme appropriée. Cette forme diffère pour les deux sortes d'électrodes : les saillies des rubans

positifs sont trapézoïdales ou triangulaires, suivant les cas ; elles sont très rapprochées; dans les négatifs les saillies, en queue d'aronde, sont plus espacées ; cette disposition donne aux plaques positives, généralement plus vite usées que les autres, une plus grande solidité.

Ces rubans, coupés à la dimension voulue, sont assemblés par soudure autogène, dans un cadre de plomb doux, et on laisse entre eux un jeu de quelques millimètres (pour permettre la dilatation des lames dans le sens vertical et la libre circulation de l'électrolyte).

La matière active spéciale de ces accumulateurs se dilate par la formation, elle pénètre parfaitement, la pierre ponce et remplit exactement les vides des rubans sans qu'il y ait à craindre la chute de la substance due souvent à la contraction. Les cadres portent de chaque côté une saillie destinée à suspendre les plaques sur deux dalles de verre inclinées (fig. 136). La séparation des lames voisines est assurée, comme dans le modèle Blot, par des tubes de verre.

Les modèles que nous avons vus sont du type Planté; nous allons maintenant nous occuper de ceux du genre Faure, avec additions d'oxydes de plomb au métal.

Accumulateurs Faure-Sellon-Volckmar. — Nous avons vu l'inconvénient des premiers types Faure. Sellon a eu l'idée d'employer une sorte de grille en plomb antimonié servant de support à la matière active. Cette dernière est introduite, sous forme de pâte, dans les interstices des grilles. Les plaques sont reliées de deux en deux et sont alternativement positives et négatives; on leur donne leurs qualités respectives comme dans l'élément Faure primitif: une pâte au minium sert pour les plaques positives et une autre à la litharge pour les électrodes négatives.

Parmi les types créés, citons le modèle anglais, communément appelé E. P. S. de la *Electrical Power Storage C°* (fig. 137).

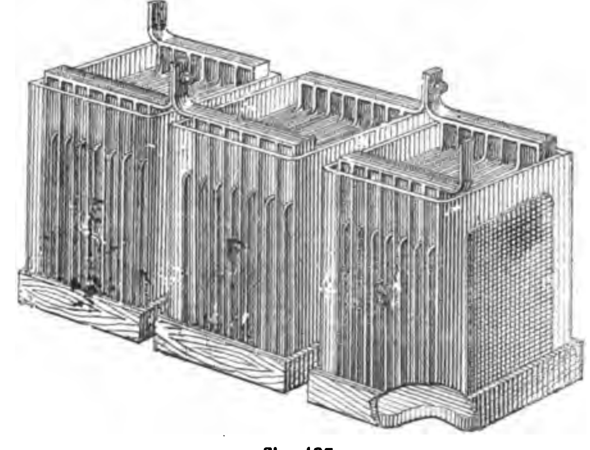


Fig. 137

La capacité de ces éléments est en moyenne de 10 ampères-heure par kilogramme pour un régime de décharge d'environ 1,5 ampère.

La Société E. P. S. a donné aux plaques, dans certains cas, une disposition particulière : les lames sont fabriquées par couple; l'une des deux reçoit la pâte au minium, l'autre celle à la litharge ; on a ainsi deux *plaques jumelles* (fig. 138) et l'on forme la batterie d'un grand nombre de couples semblables. Le montage s'effectue comme l'indique le schéma (fig. 139) : dans le premier vase, on place trois ou cinq plaques

positives isolées et, dans les intervalles, les lames négatives des plaques jumelles ; les positives plongent alors dans le deuxième vase et dans les intervalles libres, viennent se mettre de nouvelles lames négatives, et ainsi de suite. On doit donc terminer la série par des plaques négatives isolées. On a soin d'ailleurs de réunir entre elles toutes les électrodes libres positives d'une part, et toutes les électrodes libres négatives de l'autre.

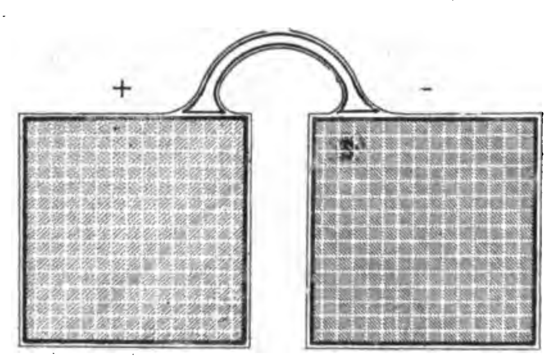
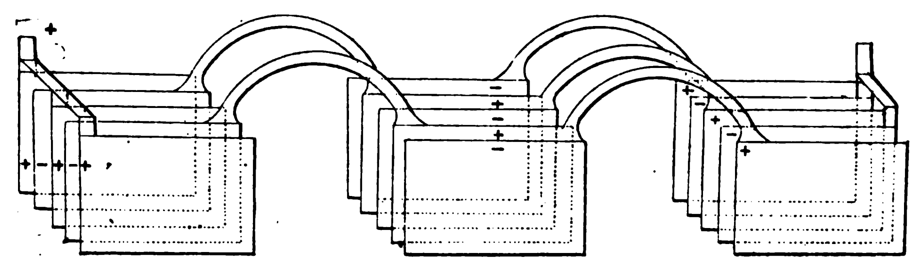


Fig. 138

Cette disposition évite les soudures et facilite l'inspection et les réparations. Mais si une lame seulement est détériorée, c'est le couple qu'il faut remplacer. Ajoutons que tous les éléments doivent se placer en longueur.


Fig. 139.

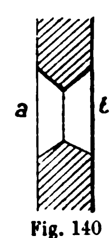


Fig. 140

Dans le système E. P. S., on constate au bout de quelque temps la chute des pastilles d'oxyde. Cela est dû sans doute aux gaz qui tendent à se dégager des divers points de la substance active. Mais la forme des alvéoles où est logée la pâte favorise cette détérioration. On est en effet obligé de donner aux barreaux de la grille un peu de dépouille pour pouvoir démouler. La forme des trous est alors indiquée (fig. 140) et les parties d'oxyde mastiquées dans les ouvertures ont tendance à se séparer en deux moitiés qui tombent de part et d'autre de la lame.

Accumulateurs Gadot. — Pour emprisonner solidement les pastilles actives, M. Gadot a eu l'idée de former les plaques de plomb de deux moitiés accolées, ce qui permet de donner aux cavités l'aspect *a'*, *b'* (fig. 141). Les lames sont rivées au plomb et on peut, en raison de la solidité de la matière active, augmenter la proportion de cette substance aux dépens du support de plomb. Comme dans tous les modèles, on connecte ensemble les lames de deux en deux et l'on a ainsi deux barres, l'une positive, l'autre négative (fig. 142).

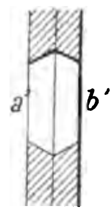


Fig. 141

Dans un nouveau modèle (M. Pisca, 1895) les plaques sont rainées et l'on a adopté pour certaines batteries, la disposition des lames jumelles. Un large espace règne au-

dessous des plaques, qui sont suspendues par des matières isolantes ; il est destiné à empêcher les courts-circuits par l'amoncellement des détritus (fig. 143).

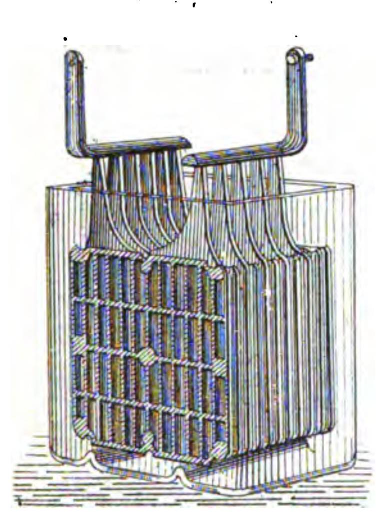


Fig. 142

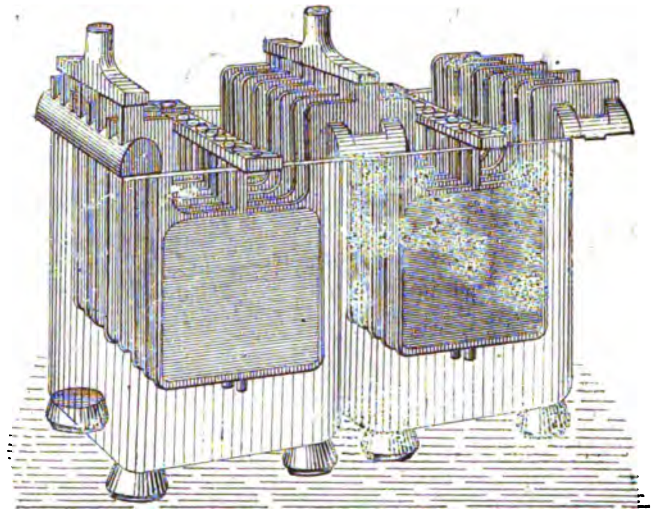


Fig. 143

La capacité moyenne est de 12 ampères-heure pour une densité à la décharge de 1,1 ampère.

Accumulateurs Tudor. — Le modèle courant est constitué par des lames de plomb épaisses pourvues d'un grand nombre de rainures horizontales (fig. 144) dans lesquelles on mastique la pâte d'oxyde. Les plaques ainsi préparées sont soumises à une pression très énergique, ce qui emprisonne les matières actives. On obtient ainsi les plaques définitives qui constituent les éléments représentés (fig. 145).

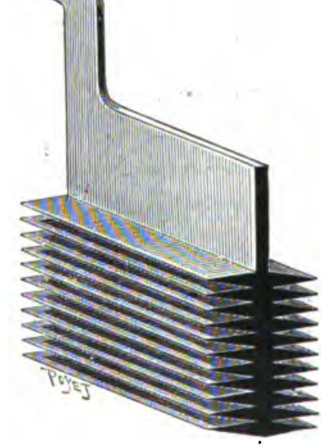


Fig. 144

Les substances actives servent en quelque sorte à amorcer la formation. Au bout de quelques mois de service, la production d'oxydes est très profonde dans la masse même des plaques et ces accumulateurs se comportent dès lors surtout comme des éléments genre Planté ; leur capacité va donc en augmentant.

En raison de la grande épaisseur des plaques et aussi sans doute grâce à la fixation spéciale du corps actif, ces éléments ont une longue durée. Mais leur poids est considérable ce qui diminue la capacité spécifique de ces modèles d'accumulateurs.

Un autre type d'élément Tudor a figuré au concours de l'*Automobile-Club*. Il a été étudié en vue d'augmenter cette capacité spécifique. Il est formé de deux sortes de plaques : les + sont du genre Planté ; les — au contraire sont à oxyde rapporté. Ces lames positives sont en plomb doux fondu et divisées en un grand nombre de lamelles

horizontales par des intervalles réguliers et réunies entre elles par des cloisons verticales distantes d'un centimètre. La surface active de la plaque est ainsi notablement augmentée ce qui permet de demander à l'élément, en cas de besoin, un courant de

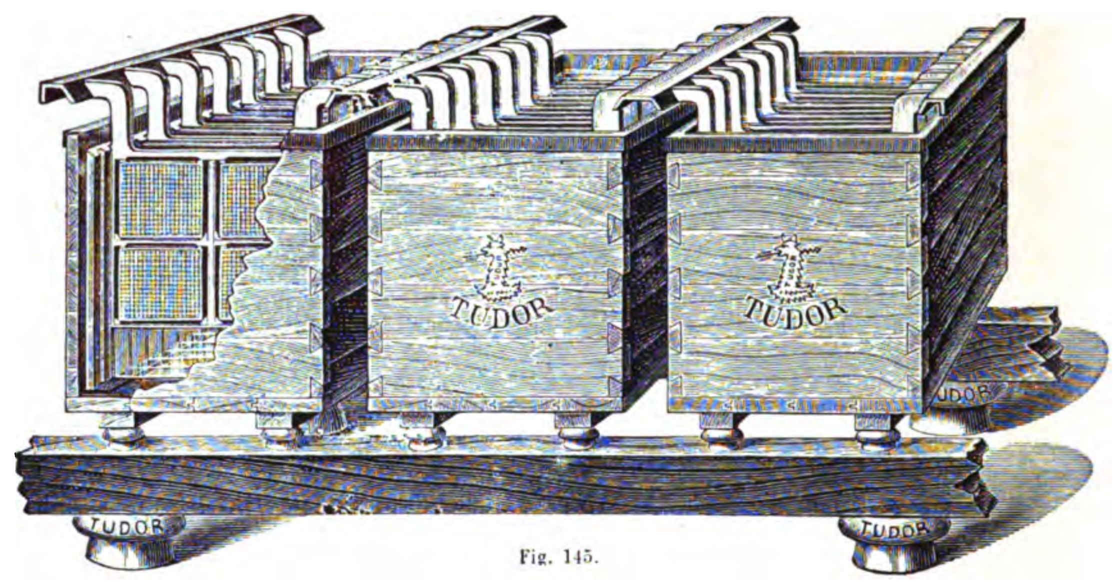


Fig. 145.

très grande intensité. Ces plaques + portent, à leur partie supérieure, des anneaux dans lesquels on passe des barres d'ébonite destinées à suspendre ces électrodes. Ainsi soutenues, ces plaques sont libres dans le bas et leur dilatation peut se faire aisément.

Les négatives sont partagées en cellules rectangulaires dans lesquelles on introduit la pâte. Elles sont réunies entre elles par quatre bandes soudées ce qui fait de tout l'ensemble négatif une sorte de bloc reposant sur des épaulements intérieurs portés par le bac en *ébonite*, à sa partie supérieure, C'est sur cet ensemble négatif que s'appuient par les barres d'ébonite, les plaques positives de l'élément.

Le couple complet, à neuf plaques, pèse 21,5 kilogrammes; il peut donner une énergie moyenne d'environ 200 watts-heure ce qui correspond à une énergie spécifique de 9,3 watts-heure.

Accumulateur Fulmen. — Cet élément est surtout construit en vue de la traction électrique; le modèle courant employé dans les fiacres automobiles a ses plaques formées d'un quadrillage comprenant 24 alvéoles dans lesquelles est logée la matière active. Cette matière constitue à elle seule les trois quarts environ du poids total des électrodes.

Dans ces conditions un élément de 13 plaques, avec vase d'ébonite pèse complet 7,5 kilogrammes et il donne, en régime normal, environ 105 ampères-heure, ce qui correspond à 200 watts-heure. Son énergie spécifique est donc considérable; elle vaut :

$$\frac{200}{7,5} = 26,66 \text{ w.-h.}$$

Le modèle présenté au concours de l'Automobile-Club était constitué par des grillages en plomb antimonié doubles du genre de ceux employés par M. Gadot. Dans les vides étaient placées des pastilles percées de trous. Ces éléments, plus robustes que les précédents ont une énergie spécifique moyenne d'environ 15 watts-heure.

Un assemblage de plaques négatives Fulmen et de plaques positives Blot à navettes horizontales constituait, au même concours, un élément dit Blot-Fulmen répondant à une énergie moyenne de 10 watts-heure environ par kilogramme d'élément.

Accumulateurs Julien, Laurent Cély, Boese. — L'élément *Julien* est à grille de plomb mais il présente cette particularité que la carcasse est en plomb antimonié auquel on ajoute quelques centièmes de mercure. Cette addition offre l'avantage de rendre les plaques absolument inattaquables par l'électrolyte. En outre les pastilles d'oxyde sont perforées, ce qui permet une utilisation plus complète de la matière active.

L'élément *Laurent Cély* est obtenu en façonnant d'abord des pastilles de chlorure de plomb. Ces pastilles sont ensuite disposées dans un moule où l'on coule le plomb. Ce métal forme alors un treillage qui emprisonne le chlorure et il suffit de traiter les plaques ainsi constituées par l'électrolyse pour transformer le sel en oxyde.

Dans l'accumulateur *Boese* la plaque tout entière est en substance active, elle est encadrée de plomb et ce métal sert simplement de conducteur. La pâte est à base de minium (pôle +) et à base de minium et de litharge (—) avec de l'alcool et des carbures tirés du goudron. La plaque façonnée est percée d'un grand nombre de trous ce qui facilite le départ des gaz. Après séchage, elle est durcie dans un bain acide puis on la dispose dans son cadre. Rapportée à un kilogramme d'électrodes, la capacité de cet accumulateur peut atteindre 25 ampères-heure.

Accumulateur au cuivre — Nous avons vu (page 115) que la pile à l'oxyde de cuivre est réversible. Elle peut par conséquent être employée comme couple secondaire et c'est ce qui a été fait pour la première fois par MM. Commelin et Desmazures. Un modèle plus récent est celui de la *Compagnie Waddell-Entz*; il comprend un récipient mince en acier, contenant à l'intérieur des toiles de même métal régulièrement espacées. Toutes ces pièces font corps avec le vase au point de vue électrique; elles constituent les électrodes négatives. Entre elles sont disposées les lames positives; on les constitue au moyen d'un gros fil de cuivre entouré d'une pâte à l'oxyde de cuivre, fil que l'on enroule ensuite en spirale de façon à former une surface plane. On a un certain nombre de plaques semblables toutes reliées entre elles et l'ensemble est baigné par une lessive de potasse caustique. On a soin d'ailleurs de séparer le liquide de l'atmosphère par une couche d'huile lourde.

L'appareil étant ainsi disposé, il s'agit de le *former* par le passage du courant; l'oxyde de cuivre est réduit à l'état de cuivre poreux. Ensuite la charge peut être effectuée : le zincate dépose du zinc sur les lames d'acier tandis que le cuivre divisé se transforme en oxyde cuivreux rose; la décharge remet alors l'accumulateur dans



l'état où il se trouvait avant la charge, et l'appareil peut continuer à fonctionner.

Le poids de l'élément est faible; sous un régime de décharge de 3 ampères par kilogramme de plaques, la capacité est de 23 ampères-heure environ.

La résistance intérieure est très faible.

Quant à la force électromotrice, elle n'a pas la même valeur que dans les accumulateurs au plomb; à la charge, la différence de potentiel entre les deux bornes est de 0,9 volt environ et, à la décharge, elle tombe à 0,8 en moyenne.

Accumulateurs divers. — Comme nous l'avons indiqué en commençant cette étude et comme nous venons de le voir en examinant les accumulateurs au cuivre, le plomb (ou ses oxydes) n'est pas le seul corps utilisable. On a essayé d'autres électrodes et d'autres liquides que la solution sulfurique. Mais, à part l'élément au cuivre, ces types n'ont reçu aucune application. L'un d'eux est l'*accumulateur au zinc*; il est formé d'une lame négative de zinc amalgamé plongeant dans une rigole contenant du mercure. L'électrode positive est au plomb, d'un modèle quelconque; une enveloppe de tissu d'amiante empêche la chute de la matière active. Quant à l'électrolyte c'est une dissolution de sulfate de zinc acidulée par SO^4H^2.

Les *accumulateurs à gaz* reposent sur une expérience de MM. Cailletet et Colardeau (1894):

Soit un voltamètre à eau acidulée et à lames de platine; les gaz hydrogène et oxygène dus à un premier courant, se recombinent sous l'action d'un courant inverse et, après rupture, on peut constater une différence de potentiel entre les deux électrodes; il en résulte donc un courant secondaire. Cet effet est bien plus puissant si on remplace le platine compact par de la mousse du même métal et il est encore amplifié si on fait usage de gaz sous pression. L'accumulateur comprend donc un cylindre d'acier éprouvé à une pression très élevée; la mousse de platine, enfermée dans un sac de soie, plonge dans l'eau acidulée au dixième: elle forme les deux électrodes. Un tel élément possède une très grande capacité spécifique; avec un kilogramme de platine, on peut obtenir un courant secondaire de 100 ampères environ.

Il est d'ailleurs possible de remplacer le système hydrogène-oxygène par un autre (chlore-hydrogène par exemple).

Disposition et entretien des accumulateurs. — Les accumulateurs doivent être traités avec des soins extrêmes.

Le choix du local est d'une grande importance; cette salle doit être bien aérée et bien sèche pour éviter les dépôts d'humidité sur les bacs, les isolateurs et les supports, ce qui nuirait à l'isolement de ces couples. La température de ce local doit, autant que possible, ne jamais dépasser 20° et ne pas descendre au-dessous de 5°. Ce lieu doit être éloigné des pièces métalliques et des salles de machines, à cause du dégagement de vapeurs acides produit par les accumulateurs.

Chaque élément est supporté par des isolateurs en verre reposant sur des chantiers en bois, lesquels sont encore séparés du sol par des isolateurs à l'huile (voir figure 145)



représentant une partie de batterie Tudor). On place souvent chaque couple dans une caisse pleine de sciure de bois.

L'acide employé comme électrolyte doit être très pur; il en est de même de l'eau. Comme acide il faut absolument rejeter celui que l'on fabrique par les pyrites pour ne prendre que l'acide au soufre et on devra en outre s'assurer par des essais chimiques que le produit ne renferme aucune impureté, ni chlore, ni arsenic, ni cuivre, ni fer, etc.

La moindre trace de matière étrangère peut avoir une influence néfaste considérable sur les éléments secondaires.

Quant à la richesse de l'électrolyte en acide, elle varie un peu avec les éléments que l'on emploie. Généralement, on adopte la concentration correspondant à 22 ou 24° Baumé, soit aux densités 1,18 et 1,20. On obtient ces liquides par les formules :

Pour 22° B	Acide sulfurique pur à 66°	24,5	parties	en poids
	Eau distillée ou eau de pluie filtrée	75,5	—	—
Pour 24°	Acide	27,1	—	—
	Eau	72,9	—	—

Il est bien entendu que ce mélange doit être fait avec toutes les précautions d'usage; il faut avoir soin de ne pas verser l'eau dans l'acide mais d'ajouter au contraire l'acide à l'eau, et lentement, en agitant le liquide. Cette opération ne doit pas s'effectuer dans les bacs des éléments mais dans des touries de verre (et non de grès pour éviter les impuretés du vernis) et l'électrolyte n'est distribué dans les vases qu'après complet refroidissement.

Ce liquide doit dépasser de 1 ou 2 centimètres les plaques de plomb. S'il baisse avec le temps, on ajoute de l'eau pour remplacer celle qui est évaporée. On peut d'ailleurs empêcher cette perte de liquide en versant une légère couche d'huile dans chaque bac. Il est nécessaire de vérifier de temps en temps, au moyen du densimètre, la constance du titre en fin de charge.

Quand la batterie d'accumulateurs vient d'être installée il faut lui donner une première charge généralement prolongée. Cette charge dite *de réduction* doit avoir pour résultat de faire disparaître un peu de sulfate de plomb qui recouvre souvent les plaques; on la continue ordinairement jusqu'à ce que les plaques négatives aient une couleur d'un gris bleuté et les positives d'un brun foncé.

A partir de cette première opération, les charges et les décharges doivent se faire en suivant les prescriptions indiquées. Il est bon d'avoir sur le circuit un ampèremètre enregistreur qui marque dans les deux sens la charge et la décharge et qui permet alors de se rendre compte des quantités d'électricité absorbées et récupérées par la batterie.

De temps à autre on vérifie le voltage de chaque élément; si quelques couples ont une f. é. m. inférieure à la valeur normale, on les sépare du circuit, on les examine, puis après réparation, s'il y a lieu, on les remet en service après leur avoir donné une



surcharge. Si la cause d'infériorité des éléments est un court-circuit, matière quelconque engagée entre deux plaques voisines, on fait tomber cet obstacle ou on le retire.

Il est bon de veiller d'une façon continue au bon isolement de la batterie; il faut que les connexions, bacs, chantiers, etc., ne soient pas mouillés d'acide.

Dans le but de donner aux accumulateurs toute l'attention possible, on fait l'installation de manière que l'on puisse circuler tout autour des couples; les visites sont ainsi rendues plus faciles et plus efficaces.

On reconnaît souvent que les éléments secondaires n'ont pas été traités avec tous les soins voulus à une couche blanche de sulfate qui recouvre les plaques. Cette croûte est extrêmement gênante, elle diminue la conductibilité, empêche la pénétration des actions chimiques et fait décroître la capacité des couples. Le remède est alors une surcharge mais c'est toujours aux dépens de la durée des éléments.

Quoi qu'on fasse la durée des couples est limitée; les plaques positives sont d'ailleurs plus rapidement hors d'usage que les électrodes négatives.

Remarque. — L'acide libéré pendant la charge paraît se former goutte à goutte; il gagne ainsi la partie inférieure des bacs ce qui donne un électrolyte hétérogène : le bas moins résistant livre surtout passage au courant et la partie inférieure des plaques travaille plus que le reste. Ce fait explique l'usure inégale très souvent constatée lorsque les éléments ont été soumis à des régimes excessifs. C'est aussi une contre-indication à l'emploi des liquides immobilisés comme on le fait dans certains éléments transportables.

Usages des accumulateurs. — On peut dire d'une manière générale que les accumulateurs permettent d'*emmagasiner l'énergie*. Mais cette mise en réserve ne se fait évidemment pas sans pertes. Nous avons en effet :

1° La dynamo qui ne rend pas absolument toute l'énergie que lui confie le moteur ;

2° De la dynamo aux accumulateurs, les fils absorbent, sous la forme calorifique, une certaine somme de travail ;

3° Enfin l'accumulateur a un rendement maximum de 86 %.

Malgré ces pertes, on utilise souvent les accumulateurs ; et leurs emplois se ramènent à trois principaux :

1° Ils servent de simples *conservateurs d'électricité*. Un cas fréquent est le suivant : on dispose d'un moteur, machine à vapeur, par exemple, qui n'est pas complètement utilisé pendant la journée. Le surplus du travail que cette machine peut donner est mis en réserve dans les accumulateurs, et le soir ces éléments sont chargés de l'éclairage ou de toute autre fonction. Les stations centrales d'électricité les emploient souvent; nous en reparlerons plus tard (voir *Distribution de l'électricité*).

Dans la traction des voitures par accumulateurs, la propulsion des embarcations, l'aviation, etc., l'usage est identique.

2° Ce sont aussi des *régulateurs de machines électriques*. Le courant des dynamos entraînées par des moteurs plus ou moins réguliers n'a jamais une constance absolue.

S'il sert à alimenter des lampes, les irrégularités se traduisent par des intermittences dans la lumière. On peut facilement éviter cet inconvénient ; et pour cela, on relie les bornes de la dynamo à une batterie d'accumulateurs de force électromotrice égale à celle que l'on désire maintenir dans les appareils. Si momentanément cette tension est dépassée par la machine, les accumulateurs absorbent l'excès du courant : ils fournissent, au contraire, une certaine somme d'énergie si le voltage de la machine vient à baisser ; on a donc un réglage automatique ; et les couples de la batterie n'ont pas besoin d'être pesants, car ils ne doivent absorber ou fournir qu'une assez faible quantité de travail. On a là ce qu'on appelle une *batterie-tampon*.

3° Les accumulateurs sont encore des *transformateurs d'énergie électrique*. Supposons que l'on dispose de 60 éléments ; on les charge en tension et on a alors :

$$60 \times 1{,}95 = 117 \text{ volts}$$

disponibles à la décharge et si le régime est de 20 ampères, nous comptons sur une puissance de :

$$117 \times 20 = 2.340 \text{ watts.}$$

Nous pouvons employer cette somme d'énergie à toutes sortes d'usages. En particulier, soit une opération électrolytique ; un tel potentiel est trop grand pour ce cas et d'autre part le courant de 20 ampères peut sembler insuffisant comme intensité. Alors on transforme le courant : au lieu de laisser les accumulateurs en série, on les met en lignes parallèles ; faisons, par exemple, douze lignes de cinq éléments ; nous avons un voltage de

$$5 \times 1{,}95 = 9{,}75 \text{ volts}$$

et une intensité qui peut atteindre :

$$12 \times 20 = 240 \text{ ampères}$$

sans dépasser le régime des accumulateurs.

On aurait pu faire d'ailleurs la transformation inverse : charger en quantité ou en séries parallèles et décharger en tension.

Nous reviendrons d'ailleurs plus loin (*Distribution*) sur les diverses combinaisons auxquelles se prêtent les couples secondaires.

Problème sur les accumulateurs. — Nous choisirons pour le moment un cas très simple : nous voulons, au moyen des accumulateurs, et sans nous occuper de la charge, assurer un service d'éclairage de 100 lampes mises toutes en dérivation les unes par rapport aux autres et exigeant chacune 50 watts sous 110 volts.

La puissance totale demandée est :

$$100 \times 50 = 5.000 \text{ watts}$$



et l'intensité du courant s'exprime par :

$$I = \frac{5.000}{110} = 45{,}4 \text{ ampères.}$$

Il nous faut donc un élément capable de donner à la charge environ 50 ampères.

Prenant le catalogue des divers modèles d'accumulateurs de la marque choisie, nous sommes de suite fixés sur le numéro à demander : le poids de plaques doit être d'environ 40 kilogrammes par élément. A ce modèle se rapporte, par exemple, une capacité de 400 ampères-heure : l'éclairage pourra durer 9 heures environ.

Il s'agit maintenant de déterminer le nombre d'éléments à employer : au début la tension de décharge dépasse 2 volts, mais si l'on veut profiter de toute l'énergie emmagasinée, on descend à 1,85 volt. Il faut alors, quand cette limite est atteinte :

$$\frac{110}{1{,}85} = 60 \text{ éléments en forçant.}$$

Nous avons ainsi un poids de plaques égal à :

$$60 \times 40 = 2.400 \text{ kilos}$$

et une dépense de 5.000 francs environ.

Remarquons qu'au début, un certain nombre d'éléments resteront en réserve (éléments de réduction) ; on ne les introduira dans le circuit qu'au fur et à mesure de la diminution de force électromotrice.

QUATRIÈME PARTIE

ÉLECTRO-MAGNÉTISME ET ÉLECTRO-DYNAMIQUE

CHAPITRE PREMIER

PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX DE L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME

L'*électro-magnétisme* étudie les actions réciproques des aimants et des courants ; l'*électro-dynamique* est constituée par les actions de deux courants l'un sur l'autre.

Expérience d'Œrsted. — Elle date de 1820. Prenons une aiguille aimantée NS mobile autour d'un axe vertical et disposons parallèlement à elle un fil AB parcouru par un courant (fig. 146) ; on voit immédiatement l'aiguille dévier et cet écart peut égaler 90° si le courant est énergique.

Pour étudier le sens de la déviation, prenons comme plan de figure le plan du méridien magnétique :

1° Supposons d'abord le courant placé au-dessus de l'aiguille et allant de A vers B (fig. 146) ; le pôle Nord est immédiatement chassé en arrière ;

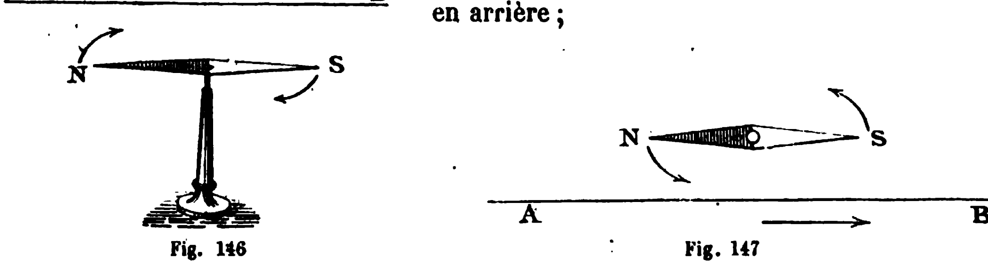


Fig. 146 — Fig. 147

2° Transportons le même courant au-dessous du barreau ; la déviation change de sens : le pôle Nord est amené en avant (fig. 147) ;

3° Remettons le fil dans sa situation première, mais renversons le courant de manière

à le diriger de B vers A ; nous voyons le pôle Nord amené en avant (fig. 148) comme dans l'expérience 2°.

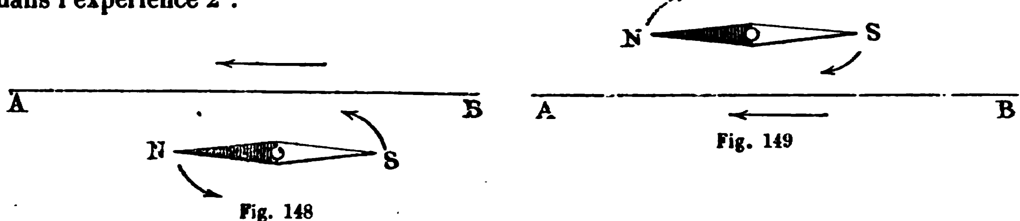


Fig. 148
Fig. 149

4° Enfin, amenons le courant renversé au-dessous de l'aiguille ; nous faisons dévier le pôle Nord en arrière du dessin (fig. 149).

Œrsted avait énoncé quatre lois relatives à ces quatre expériences ; Ampère, le premier, trouva une formule unique pour exprimer l'action d'un courant sur un aimant. Il a commencé par personnifier le courant : on considère un observateur couché le long du fil, la face vers l'aiguille et de façon que l'électricité lui entre par les pieds et lui sorte par la tête. La droite et la gauche de cet observateur sont appelées la droite et la gauche du courant. Cela posé, on remarque que, dans les quatre cas possibles indiqués :

Le *pôle Nord est dévié vers la gauche du courant.*

Dans la première expérience, en effet, l'observateur est couché sur la face, les pieds en A, la tête en B ; sa gauche est en arrière.

Dans la seconde, il se retourne face pour face pour regarder l'aiguille ; sa gauche change de côté ; elle vient en avant.

Le troisième cas, tout en laissant le personnage au-dessus de l'aiguille et sur la face, permute la tête et les pieds : la gauche est amenée en avant comme dans 2°.

Enfin, si nous passons au dernier cas, l'action est bien inverse de la précédente car l'observateur se porte au-dessous de l'aimant en se retournant face pour face.

La loi d'Ampère résume donc bien tous les cas qui peuvent se présenter.

Loi de l'action d'un courant sur un aimant. — Dans l'expérience d'Œrsted, l'aiguille est déviée d'un angle différent en général de 90°. L'aimant est alors soumis à deux actions : celle de la terre que nous connaissons, et celle du courant. Pour étudier cette dernière seule, il faut soustraire l'aiguille à la force terrestre. On y arrive en prenant un barreau mobile dans un plan MN autour d'un axe, et on place cet axe de rotation dans la direction de la force magnétique. Alors la terre ne peut plus diriger l'aiguille ; son action est en effet normale au plan MN et ne pourrait que faire sortir l'aiguille de ce plan, ce qui n'est pas possible : le barreau se tient en équilibre dans toutes les positions ; il est *astatique*. Si on dispose alors un courant parallèlement à AB, on voit l'aiguille se mettre exactement en croix avec le fil. On en conclut donc que :

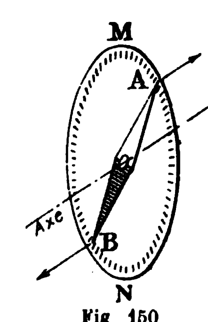


Fig 150

Le pôle Nord est dévié de 90° vers la gauche du courant.

Action simultanée de la terre et d'un courant sur une aiguille. — Il faut des conditions tout à fait exceptionnelles pour que le courant agisse seul sur l'aimant. Dans la plupart des cas, on doit tenir compte de la force directrice terrestre en même temps que de l'action électro-magnétique.

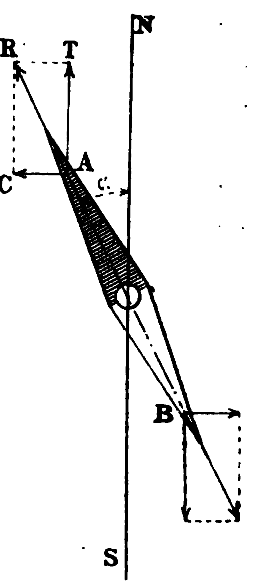


Fig. 151

Soit alors une aiguille aimantée mobile dans un plan horizontal. Abandonnée à elle-même, elle se tient suivant le méridien NS. Faisons passer un courant parallèlement à l'aiguille, suivant NS. Il exerce sur l'aiguille une action perpendiculaire à sa direction tandis que la terre agit sur les pôles pour les remettre dans leur position première. Sous l'influence de ces deux forces rectangulaires, l'aiguille prend une certaine position d'équilibre AB. Examinons les forces qui sont appliquées à l'un des pôles, A, par exemple. Nous avons :



T, action de la terre ;

C, action du courant.

Ces deux forces se composent suivant la règle du parallélogramme et donnent la résultante R.

L'équilibre n'est possible que si l'aimant est dirigé suivant le prolongement de R ; sa déviation est l'angle α.

Multiplicateur. — Plus nous augmentons la force AC, plus la déviation est grande, si AT reste constante. Pour accroître l'action du courant, on forme, avec le fil, un cadre autour de l'aiguille et on fait coïncider le plan de cette spire avec celui du méridien magnétique.

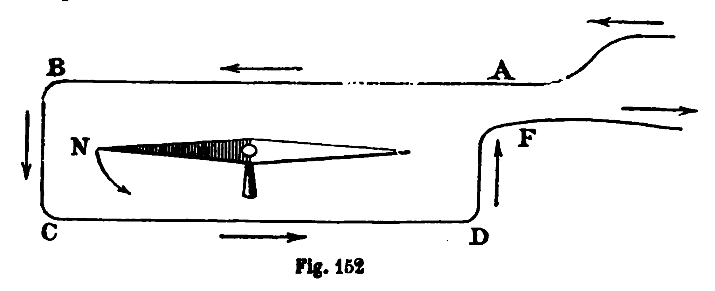


Fig. 152

Si on suppose au courant le sens de flèches, on voit que le pôle Nord N est dévié en avant du tableau par la partie AB du fil ; il en est de même de toutes les actions des diverses parties du rectangle puisque la gauche du courant est toujours située en avant de la figure. On augmente encore les déviations de l'aiguille si on enroule sur le cadre d'autres tours semblables au premier.

On a ainsi un *multiplicateur* qui est utilisé dans la construction du galvanomètre, appareil destiné à mesurer l'intensité du courant électrique.

Mais il y a un autre moyen d'amplifier les déviations de l'aimant ; au lieu d'accroître

la force AC provenant du courant, on peut diminuer l'action terrestre ; pour cela on dispose, à proximité de l'aiguille, un aimant capable d'exercer un effet contraire à celui de la terre et, par ce moyen, on diminue beaucoup la force AT. Comme nous le verrons plus loin, on arrive au même résultat par l'emploi d'un système de deux aiguilles semblables, solidaires et placées d'une façon inverse.

Action d'un aimant sur un courant. — Faisons maintenant l'expérience réciproque de celle d'Œrsted. Prenons un courant présentant une partie mobile. Nous verrons comment on réalise facilement ce circuit. Pour le moment, nous pouvons nous contenter de ce qu'on appelle une pile flottante. C'est un vase à eau acidulée V dans lequel on dispose un équipage mobile formé de deux lames, l'une de zinc, l'autre de cuivre portées par une rondelle de liège et reliées entre elles par un fil conducteur. L'appareil constitue un couple de Volta et un courant électrique parcourt le fil. On peut dès lors présenter à ce circuit un barreau aimanté et l'on voit se produire un changement d'orientation : le *conducteur* mobile finit par se placer *perpendiculairement à l'aimant* et on trouve le *pôle Nord à la gauche du courant voisin.*

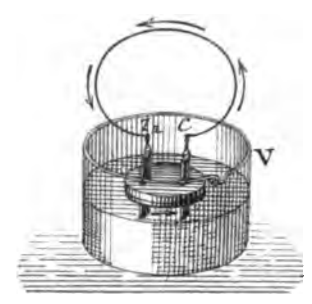


Fig. 153

Ainsi l'aimant et le courant se placent l'un par rapport à l'autre toujours dans la même situation quelle que soit la partie mobile ; leurs actions sont réciproques.

CHAPITRE II

LOI ÉLÉMENTAIRE DE L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME

Définition de la loi élémentaire. — Nous savons qu'un courant agit sur un aimant et réciproquement. L'action dépend évidemment de plusieurs choses :

De l'intensité et de la forme du courant ;

De la position de l'aimant par rapport au courant.

Il faut donc connaître, pour chaque courant particulier, l'action sur un aimant dans les diverses positions possibles.

Au lieu de faire directement cette détermination, on a cherché l'action d'une portion infiniment petite ds de courant sur un pôle O situé à la distance r. Connaissant cette force, il est possible, par les méthodes du calcul intégral, de composer entre elles les actions provenant de tous les éléments tels que AB, qui constituent le courant entier.

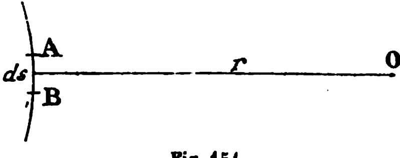


Fig. 154

La loi élémentaire est cette loi qui nous donne l'action mutuelle de l'élément de courant et du pôle d'aimant.

Moyen de déterminer la loi élémentaire. — Cette loi n'est pas donnée directement par l'expérience. C'est un résultat du calcul et voici quel en est le point de départ :

On considère un courant rectiligne indéfini XY (fig. 155) et on le fait agir sur un pôle d'aimant A placé à une distance d du fil. Il est possible de déterminer *expérimentalement* la grandeur de l'action qu'exerce le courant sur le pôle et de passer ensuite *par le calcul* à l'action d'un élément isolé de courant sur A.

Fig. 155

L'expérience indiquée a montré que :

La force f est proportionnelle à l'intensité du courant et varie en raison inverse de la distance d :

$$f = K \times \frac{i}{d}$$

Elle est dirigée vers la gauche du courant XY si le pôle est Nord. C'est la loi de Biot et Savart.

Evidemment si le courant exerce sur le pôle une telle action, nous pouvons dire, en vertu de l'égalité de l'action et de la réaction que le pôle exerce sur le courant indéfini une force f égale à la précédente mais dirigée vers la *droite* du courant si le pôle est Nord.

Le problème qui se pose est donc le suivant :

Etant donnée l'action f du pôle sur tout le courant XY, calculer la force exercée, soit df, sur un seul élément. C'est là une opération du calcul différentiel.

Loi de Laplace. — Le calcul a été fait pour la première fois par Laplace. Soit (fig. 156) O le pôle contenant la quantité m de magnétisme ; ds est un élément de conducteur situé à la distance r de O et traversé par un courant d'intensité i ; soit enfin α l'angle aigu de ds avec la droite AO.

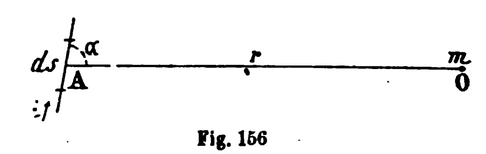


Fig. 156

Laplace a trouvé que :

L'action du pôle O sur l'élément ds est proportionnelle :

A la quantité de magnétisme m ;

A l'intensité i du courant électrique ;

A la longueur ds de l'élément.

Elle est enfin en raison inverse du carré de la distance r et varie proportionnellement au sinus de l'angle α. On a donc :

$$df = \frac{K\, m i\, ds \sin \alpha}{r^2}$$

où K est une constante, la même qui figure dans la loi de Coulomb, relative aux actions magnétiques. Nous pouvons d'ailleurs, au moyen d'un choix convenable des unités, rendre cette quantité égale à 1 et par suite faire disparaître ce terme K de la formule.

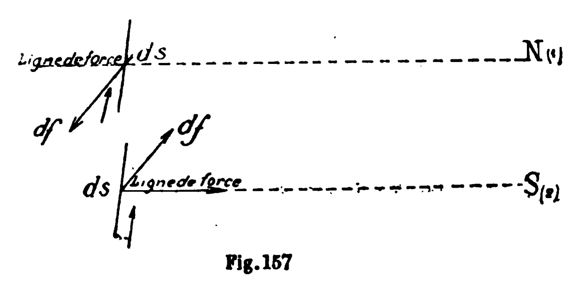


Fig. 157

Cette force élémentaire est appliquée à l'élément; elle est perpendiculaire au plan formé par le pôle et par l'élément et se dirige vers la *droite* du courant si le pôle est *Nord* (ce qui est bien conforme à la règle d'Ampère, le pôle se trouvant ainsi à la gauche du courant). La force au contraire agit vers la *gauche* dans le cas d'un pôle *Sud*. Ces

deux cas se fondent d'ailleurs facilement en un seul ; considérons pour cela les lignes de force du pôle ; elles en émanent si le pôle est Nord (fig. 157, 1) et au contraire se dirigent vers lui s'il est Sud (2). Tournons le bonhomme d'Ampère dans la direction de ces lignes : il a le dos vers N dans (1) et regarde S dans (2). Dans les deux cas, la force df se dirige vers la *gauche* de l'observateur, d'où l'énoncé unique de la loi de Laplace :

L'action d'un pôle d'aimant sur un élément de courant est perpendiculaire au plan de l'élément et du pôle et dirigée vers la gauche d'un observateur d'Ampère tourné dans la direction des lignes de force.

Cette force est proportionnelle à la quantité de magnétisme du pôle, à l'intensité du courant, à la longueur de l'élément et au sinus de l'angle α ; elle varie en raison inverse du carré de la distance de l'élément au pôle.

Connaissant cette action élémentaire du pôle sur le courant, nous pouvons en déduire immédiatement celle du courant infiniment petit sur le pôle : cette dernière est égale et directement opposée à la première, ce qui nous permet d'énoncer la réciproque de la proposition précédente :

L'action d'un élément de courant sur un pôle est appliquée à l'élément lui-même ; elle est perpendiculaire au plan de l'élément et du pôle et dirigée vers la droite d'un observateur d'Ampère tourné dans la direction des lignes de force.

Sa grandeur est :

$$df = \frac{m\,i\,ds \sin \alpha}{r^2}$$

Remarque : Ce dernier énoncé (application à *l'élément* d'une force exercée *sur le pôle*) peut paraître étonnant à première vue, mais il n'est pas à rejeter car nous n'avons pas là, une action réalisable, étant donné qu'on ne peut faire agir un élément isolé sur le pôle. Quoi qu'on fasse c'est toujours un circuit complet qui intervient. Tout ce qui

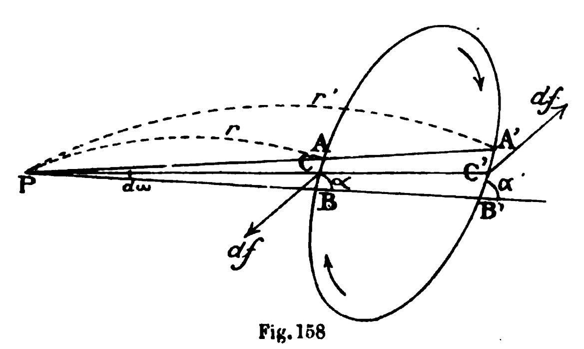


Fig. 158

peut être demandé à la loi, c'est qu'elle conduise à un résultat exact quand on l'applique à un cas expérimental ; on trouve que ce but est rempli car l'application de l'énoncé mène à la loi de Biot et Savart, donc la règle de Laplace est acceptable. Nous allons d'ailleurs montrer, pour faire disparaître le doute, que l'extension de la loi à un circuit fermé nous donne une force résultante appliquée au pôle. Supposons le circuit AA' plan et le pôle P dans le plan même de AA' (fig. 158).

Menons du point P des droites telles que PA et PB. Elles découpent le circuit en éléments correspondants AB et A'B', de longueurs ds et ds'. Soient r et r' leurs distances au pôle P.

D'après la loi énoncée, l'action df de l'élément ds sur P est dirigée en avant du plan de figure et égale à :

$$df = \frac{mi\, ds \sin\alpha}{r^2}$$

Celle de ds' est dirigée en arrière :

$$df' = \frac{m.i\, ds' \sin\alpha'}{r'^2}$$

D'ailleurs on peut écrire, si on considère les triangles PAB et PA'B' :

$$\frac{ds}{d\omega} = \frac{r}{\sin\alpha}$$

$$\frac{ds'}{d\omega} = \frac{r'}{\sin\alpha'}$$

d'où on tire :

$$ds \sin\alpha = r\, d\omega$$

$$ds' \sin\alpha' = r'\, d\omega$$

Portant dans les valeurs de df et de df' :

$$df = \frac{mi\, d\omega}{r}$$

$$df' = \frac{mi\, d\omega}{r'}$$

Ainsi ces deux forces sont en raison inverse des distances r et r'. Or elles sont parallèles et de sens opposé. Leur résultante est en un point O de la droite PC tel que ses distances à C et à C' soient inversement proportionnelles à df et à df' :

$$\frac{\overline{OC}}{\overline{OC'}} = \frac{df'}{df}$$

Et comme :

$$\frac{df'}{df} = \frac{r}{r'}$$

on peut écrire :

$$\frac{\overline{OC}}{\overline{OC'}} = \frac{r}{r'}$$

Le point O n'est autre que le point P lui-même et l'action simultanée des deux éléments est appliquée au pôle. Il en est de même pour toutes les paires d'éléments ; donc l'action du courant tout entier doit s'exercer sur le pôle, ce qui est conforme à l'expérience.

Application de la loi élémentaire. — Considérons un courant de forme circulaire agissant sur un pôle Nord placé sur l'axe du cercle, en P. Ce cas nous sera utile

dans la suite. Dans la figure 159, le plan du cadre est perpendiculaire à celui du dessin ; soit un élément placé en A, de longueur ds ; sa distance au pôle est r et l'angle α qu'il fait avec AP vaut 90°. Etant donné le sens du courant, marqué par la flèche, la force qui représente l'action de ds sur P est dans le plan de figure perpendiculaire à AP et dirigée vers le haut. Son intensité est :

$$df = \frac{m \, \mathrm{I} \, ds}{r^2}$$

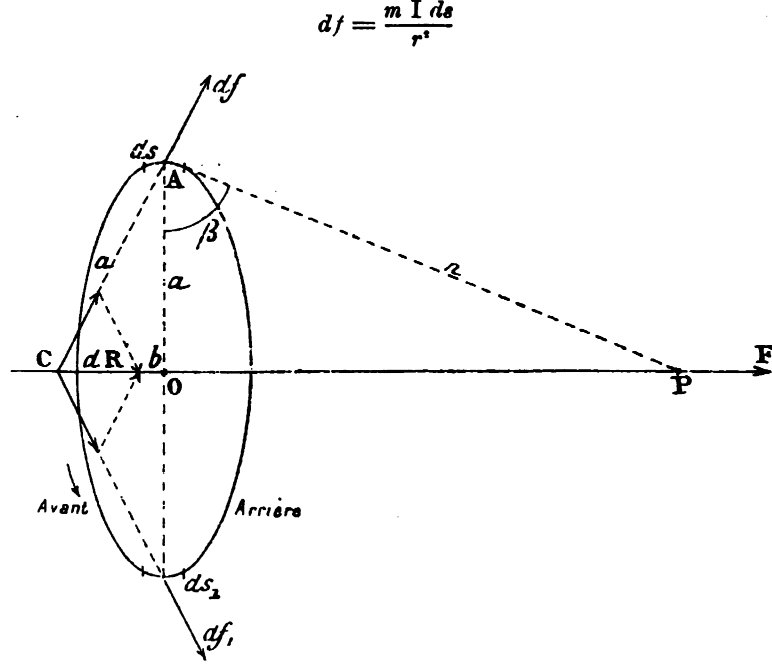


Fig. 159

De même ds_1, symétrique de ds par rapport à O, nous donne la force élémentaire df_1, symétrique elle-même de df.

Ne considérons pour le moment, de tout le circuit, que les deux portions infiniment petites ds et ds_1, et cherchons quelle est la résultante des deux forces df et df_1. Pour cela nous transportons les deux actions en leur point de croisement C et nous obtenons la force $d\mathrm{R}$ dont la grandeur est :

$$d\mathrm{R} = 2 \, df \cos a\mathrm{C}b$$

(le triangle Cab étant isocèle).

Mais l'angle $a\mathrm{C}b$ égale OAP ou β, à cause de la perpendicularité des côtés et le triangle OAP nous donne :

$$\cos \beta = \frac{a}{r}$$

donc :

$$d\mathrm{R} = \frac{2a}{r} df = \frac{2a}{r} \times \frac{m \, \mathrm{I} \, ds}{r^2} = \frac{2 a m \, \mathrm{I} \, ds}{r^3}.$$

Cette force provient de l'élément ds et de son symétrique. Si nous répétons le même raisonnement pour toutes les parties ds de la *moitié* de l'anneau, nous aurons

l'action totale de la spire, car tous les éléments auront été pris une fois. Toutes les portions autres que ds sont exactement dans la même situation que ds lui-même par rapport à P, de sorte que l'action cherchée est :

$$f = dR + dR' + \ldots\ldots = \frac{2\,a\,m\,I}{r^3}(ds + ds' + \ldots\ldots)$$

Mais $ds + ds' + .. = \pi\,a$, moitié de la circonférence ; donc :

$$f = \frac{2\,a\,m\,I}{r^3} \cdot \pi\,a = \frac{2\,\pi\,m\,I\,a^2}{r^3}$$

Cette formule s'applique quelle que soit la distance r. Un cas particulier souvent réalisé est celui où le pôle est au point O lui-même ; alors $r = a$ et il vient :

$$f = \frac{2\,\pi\,m\,I}{a}$$

S'il y a n spires semblables, l'action prend la valeur :

$$F = \frac{2\,\pi\,m\,n\,I}{a}$$

En particulier prenons une spire unique traversée par le *courant unité* agissant sur un *pôle contenant l'unité de magnétisme* placé au centre de l'anneau. Son action se réduit à :

$$G = \frac{2\,\pi}{a}$$

Cette formule nous servira dans l'étude des appareils de mesure.

CHAPITRE III

PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX DE L'ÉLECTRO-DYNAMIQUE

L'étude des actions mutuelles des courants est due à Ampère. Pour répéter les expériences, on fait usage d'appareils spéciaux comprenant des circuits fixes et des circuits mobiles ; nous supposerons que l'on emploie celui de Bertin.

Appareil de Bertin. — La partie mobile est constituée (fig. 160) par un cadre rectangulaire H, convenablement équilibré, qui tourne autour d'une de ses extrémités *d* reposant dans un petit godet de mercure *c*. L'autre extrémité du fil aboutit à une

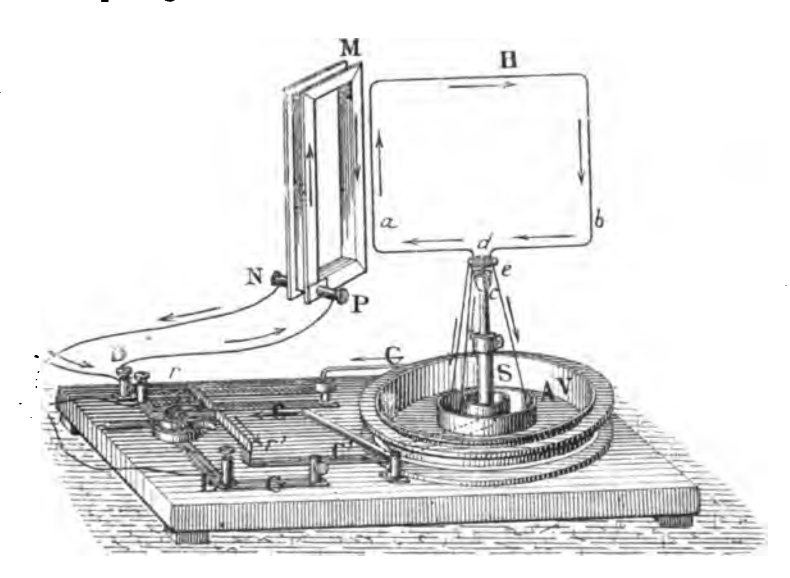


Fig. 160

bague *e*, isolée de *d*, et soutenant l'équipage A plongé dans une cuvette V à eau acidulée. Les parois de ce vase sont reliées électriquement par une bande de cuivre C, à un ressort *r*, tandis que la colonne métallique S, qui soutient le godet de mercure, est reliée au ressort *r*' par la bande C'. Ces deux lames élastiques appuient sur les pièces d'un commutateur ce qui permet d'envoyer le courant, dans un sens ou dans l'autre et aussi de l'intercepter.

On voit, sur la figure en plan (161), la disposition adoptée. Le courant de la source passe d'abord dans le circuit M, sur lequel nous reviendrons, placé entre D et E ; il

entre donc dans le commutateur par la droite, de là passe au ressort r' puis, par C', atteint la colonne, parcourt le cadre dans le sens *dabe* et descend, par les trois tiges jusqu'à la cuvette pour retourner à r et de là au pôle —.

Pour renverser ce courant, il suffit de tourner à droite la clef du commutateur : alors l'électricité entre par r et sort par r'. Pour couper le circuit, on met la poignée dans la position médiane.

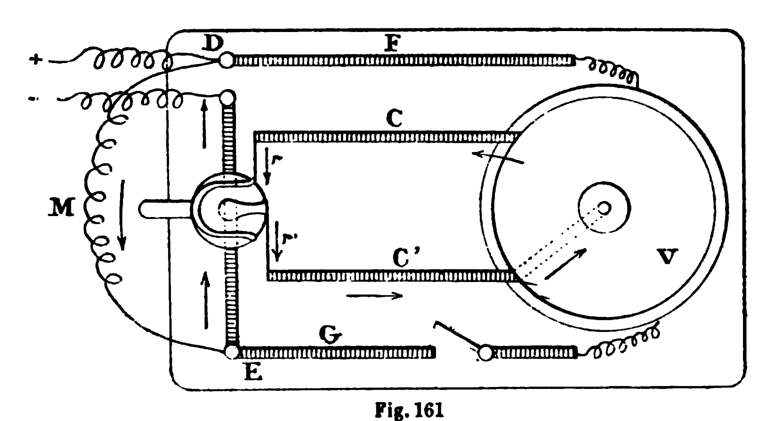


Fig. 161

Nous avons donc réalisé la partie mobile, la plus difficile à obtenir ; l'autre fixe s'intercale entre D et E. C'est ordinairement un cadre M (fig. 160 et 161) que l'on peut tenir dans la main.

Toutes les actions électro-dynamiques, se résument en trois lois qui sont relatives à l'action :

1° De deux courants parallèles ;

2° De deux courants angulaires ;

3° De courants sinueux.

I. — Lois des courants parallèles. — Supposons qu'on mette un côté CD du circuit fixe parallèlement à une portion verticale AB du cadre mobile. Faisons d'abord en sorte que les deux courants ainsi en présence soient de même sens (fig. 162) ; nous observons une attraction du cadre mobile, ce qui nous permet d'énoncer la loi :

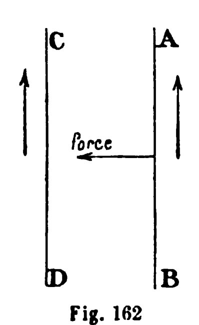


Fig. 162

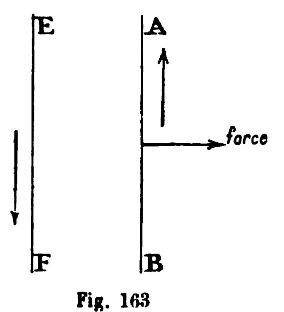


Fig. 163

Deux courants parallèles et de même sens s'attirent.

Au contraire, approchons du même fil mobile l'autre côté EF du cadre fixe où le courant est inverse (fig. 163) ; nous voyons une répulsion. Dans les deux fils ainsi éloignés, les courants ont des sens différents, ce qui conduit à la deuxième partie de la loi :

Deux courants parallèles et de sens contraire se repoussent.

II. — Lois des courants angulaires. — Disposons le fil du cadre fixe au-dessus de la partie horizontale du courant mobile de façon que les deux conducteurs fassent entre eux un certain angle. Les courants ayant les sens indiqués sur la figure 164, on voit la partie mobile AB se déplacer de manière à recouvrir CD. Ainsi les deux courants OB et OD s'attirent, de même OA et OC. Or les deux premiers s'approchent ensemble du point de croisement; les derniers, au contraire, s'en éloignent tous deux. On a donc la loi :

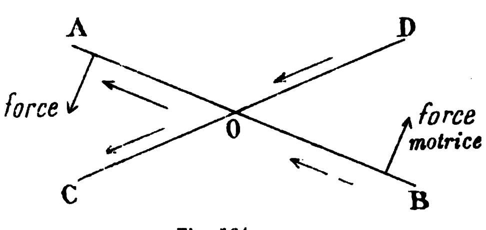


Fig. 164

Deux courants angulaires s'attirent quand ils s'approchent ou s'éloignent tous deux de leur point de croisement.

Si maintenant nous renversons le sens du courant dans l'un seulement des circuits, CD par exemple, nous voyons OB repoussé par OC, et de même OA repoussé par OD. Or ici l'un des courants se dirige vers le point de rencontre tandis que l'autre s'éloigne de ce point. Donc :

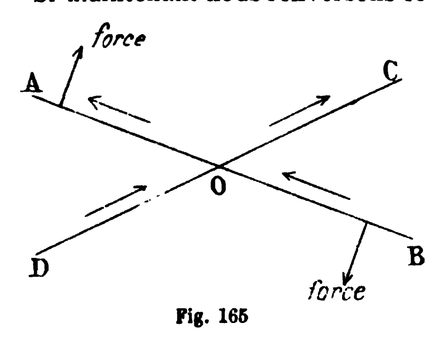


Fig. 165

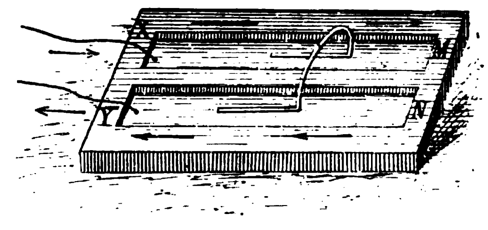
Deux courants angulaires se repoussent quand l'un s'approche et l'autre s'éloigne de leur point de croisement.

La même loi s'applique encore quand les deux courants ne sont pas dans le même plan, mais alors il faut remplacer le point de croisement par la perpendiculaire commune aux deux conducteurs.

En résumé, nous pouvons dire que :

Deux courants angulaires tendent à se placer parallèlement et dans le même sens.

Les lois des courants angulaires nous conduisent à plusieurs conséquences :


Fig. 166

1° Le principe étant vrai quel que soit l'angle, est encore applicable au cas d'un circuit rectiligne, limite d'un courant formé de deux parties angulaires dont l'angle croît jusqu'à 180°. Dans un tel conducteur, l'une des branches amène l'électricité, l'autre emporte le courant, donc les deux segments se repoussent mutuellement. On le vérifie facilement au moyen du petit appareil suivant : deux rigoles de mercure sont isolées l'une de l'autre; on les relie aux pôles d'une pile et un pont métallique joint les deux compartiments. On a donc un circuit constitué par la pile, les rigoles et le pont. Dès que le courant est lancé, on observe une vive répulsion du fil mobile;

2° Considérons maintenant deux courants rectangulaires ; leur action est réglée par

la loi énoncée ; en effet, soit AB fixe et le courant y marchant de A vers B ; disposons DC verticalement et de haut en bas ; ce dernier est mobile (fig. 167). On voit que les deux parties AC et CD s'attirent mutuellement ; au contraire, DC et CB se repoussent. Si donc la partie mobile peut se déplacer parallèlement à elle-même, elle se transporte dans le sens indiqué. Le mouvement inverse aurait lieu si on renversait le sens de l'électricité dans l'un seulement des deux conducteurs.

Fig 167

On vérifie cette conséquence en remplaçant le courant rectiligne fixe par un courant circulaire ; le deuxième est mobile sur un cylindre ayant la circonférence fixe pour directrice.

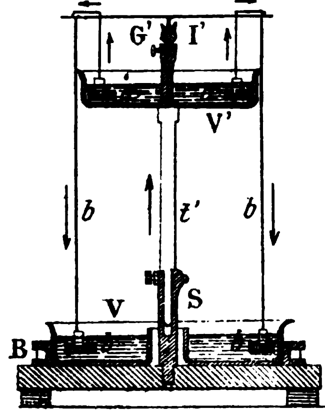


Fig. 168.

Pour réaliser le conducteur mobile, au moyen de l'appareil de Bertin, on dispose à la partie supérieure de la colonne métallique un vase V' (fig. 168) contenant de l'eau acidulée et on fait reposer dans le godet G' un équipage I' composé de deux fils isolés et terminés par deux petites lames *a* et *b* qui plongent dans les cuvettes V' et V. Si on lance dans la colonne un courant ascendant, ce courant gagne la cuvette V', monte par *a* et descend par *b*. On a donc réalisé le courant vertical mobile. Généralement on le fait double pour éviter l'action directrice de la terre.

Le courant horizontal fixe est constitué par une bobine B entourant la cuvette et dans laquelle on peut lancer le courant par la bande F (fig. 161) ; ce courant est ramené ensuite au commutateur par G. Ce circuit est donc intercalé à la place du cadre fixe M des premières expériences. Dans ces conditions, on voit l'équipage marcher en sens contraire du sens de l'électricité dans la bobine. On peut d'ailleurs changer ce déplacement conformément à la théorie, par le jeu du commutateur.

Ces mouvements devraient s'accélérer puisque la force agit continuellement ; en réalité ils deviennent uniformes après un certain temps par suite du frottement de l'équipage contre le liquide.

III. — Loi des courants sinueux.— Prenons un fil composé de deux parties l'une rectiligne *ab*, l'autre sinueuse *bc* (fig. 169). Les deux extrémités *a* et *c* sont reliées aux pôles d'une source. On approche ce système d'un courant mobile quelconque et on ne constate aucune action *pourvu que les sinuosités soient faibles*. Ainsi l'action de *ab* annule celle de *bc* ; il en serait rigoureusement de même si les deux fils étaient tendus, d'où l'on conclut que :

Un courant sinueux a même action qu'un courant rectiligne de même intensité et de mêmes extrémités (avec la restriction faite ci-dessus).

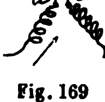


Fig. 169

CHAPITRE IV

LOI ÉLÉMENTAIRE DE L'ÉLECTRO-DYNAMIQUE

Objet de cette loi. — On peut se proposer de trouver une loi élémentaire, c'est-à-dire l'action mutuelle de deux éléments de courant.

Ici encore on doit, pour y arriver, avoir recours au raisonnement, car cette action élémentaire n'a pas d'existence réelle ; il est impossible de ne faire agir sur un segment de courant rendu mobile qu'une *portion* d'un autre courant. Dans tous les cas ce dernier courant tout entier agit sur la partie mobile du premier. Dès lors, la loi élémentaire trouvée n'a pas besoin d'avoir par elle-même un sens déterminé, elle est seulement assujettie, comme celle de l'électro-magnétisme, à conduire à des résultats exacts quand on en fait usage pour déterminer une action réalisable.

Loi d'Ampère. — Plusieurs formules satisfont à la condition qui vient d'être énoncée. La suivante est celle d'Ampère :

Appelons ds et ds' les longueurs des deux éléments ;

i et i' les intensités des courants ;

θ et θ' les angles que ces éléments forment avec la droite AA' qui les joint :

r leur distance et ω l'angle des deux éléments. Dans ces conditions on a :

$$df = \frac{K\, i\, i'\, ds\, ds'}{r^2}\left(\cos\omega - \frac{3}{2}\cos\theta \quad \cos\theta'\right)$$

K étant une constante.

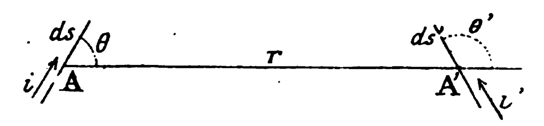


Fig. 170

Cette force est dirigée suivant la droite AA' qui réunit les deux éléments.

La loi étant connue, on peut, par le calcul, en déduire l'action d'un courant quelconque sur un autre courant.

CHAPITRE V

ÉTUDE DU CHAMP MAGNÉTIQUE

Champ magnétique des aimants. — Nous savons qu'un aimant ou un système d'aimants crée autour de lui un *champ* caractérisé par les deux propriétés :

1° Orientation d'un autre aimant (actions magnétiques);

2° Déplacement des courants (phénomènes électro-magnétiques réciproques de l'action découverte par Œrsted).

Champ magnétique des courants. — D'après les phénomènes étudiés, nous savons que, dans le voisinage d'un courant ou d'un système de courants, on observe :

1° L'orientation des aimants (expérience d'Œrsted);

2° Des mouvements communiqués à d'autres courants (actions électro-dynamiques).

De cette simple énumération de propriétés, on peut conclure que ces *courants créent autour d'eux un champ analogue à celui des aimants, c'est-à-dire un champ magnétique.*

Champ magnétique terrestre. — La terre enfin se comporte comme les aimants et comme les courants.

Nous connaissons déjà son action directrice sur les aimants; il nous reste à parler de son influence sur la position des courants.

Pour cela, il suffit de mettre dans l'appareil Bertin disposé comme on l'a dit précédemment (page 156), un seul fil vertical et de l'abandonner à lui-même. On voit ce conducteur tourner, et s'arrêter quand il forme avec l'axe de rotation un plan perpendiculaire au méridien. On peut encore suspendre une bobine mobile traversée par un courant assez intense; ce système tourne, il s'arrête dans une position parallèle à l'aiguille de déclinaison.

Ces expériences nous permettent de dire que le champ terrestre oriente les courants. *Ce champ est donc analogue à ceux des aimants et des courants.*

Intensité d'un champ magnétique. — On convient de mesurer le champ magnétique par son action sur un pôle, comme on l'a déjà dit en magnétisme.

L'intensité du champ magnétique, en un point, est la force qui s'exercerait sur un pôle Nord unité placé en ce point.

En général, cette force varie de grandeur et de direction d'un point à l'autre. Les lignes de force définies en magnétisme montrent la *direction* de ce champ. Quant au *sens*, il est du pôle Nord au pôle Sud dans le cas d'un aimant. Dans les autres cas particuliers, ce sens est ordinairement facile à déterminer.

Étude expérimentale d'un champ magnétique. — L'expérience du spectre, indiquée en magnétisme, peut être répétée avec succès lorsqu'il s'agit d'explorer un champ quelconque : on tend une feuille de papier à l'endroit étudié et on la saupoudre de fine limaille de fer; les grains s'orientent et dessinent les lignes de force. Ainsi, par exemple, soit un courant rectiligne et indéfini XY. Nous voulons étudier le champ qu'il engendre et pour cela nous passons le conducteur à travers le papier que nous maintenons horizontalement : les lignes figurent des circonférences dont le centre est au point où le fil perce le plan. Le champ est donc symétrique autour du conducteur. Pour le *sens* remarquons que le pôle Nord tend à se placer à la gauche du courant; plaçons donc un observateur dans le fil, les pieds en Y, la tête en X; le pôle Nord tend à être entraîné vers sa gauche, c'est-à-dire dans le sens contraire de celui des aiguilles d'une montre. On le vérifie au moyen de deux petites boussoles, comme l'indique la figure 171.

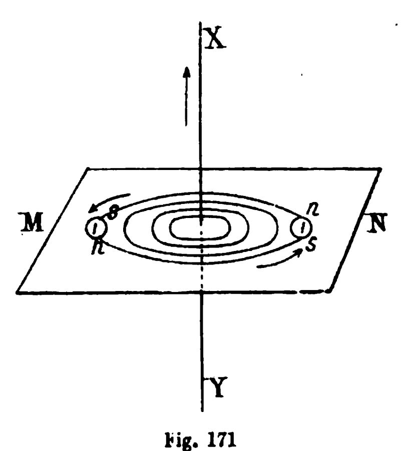


Fig. 171

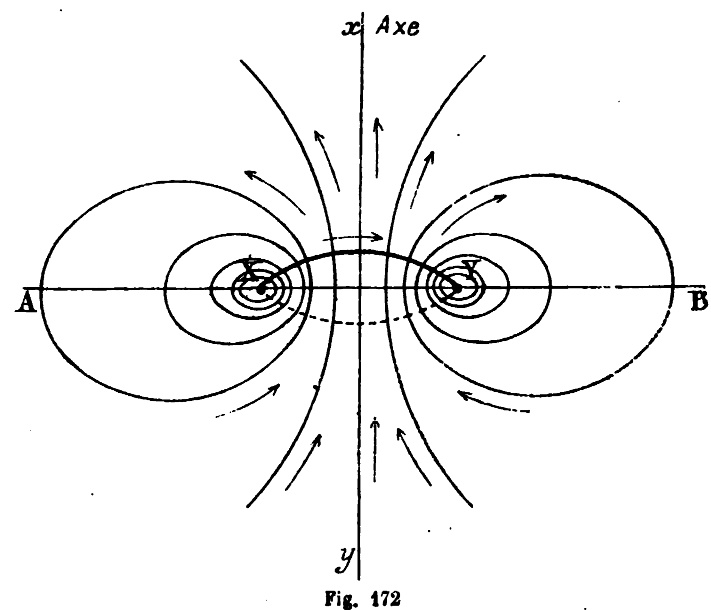


Fig. 172

Soit maintenant un anneau XY. On le tient verticalement de manière qu'il traverse en X et en Y une feuille de papier fort sur laquelle on projette la limaille. La disposition des lignes est indiquée par la figure 172. Quelques-unes entourent complètement

le fil, d'autres s'incurvent sans se fermer; enfin, dans la partie centrale, on en voit qui sont rectilignes et perpendiculaires au plan de la spire.

Pour trouver leur sens, on place dans le fil un observateur d'Ampère regardant l'intérieur de l'anneau; les lignes de force se dirigent vers la gauche de cet observateur.

Enfin, soit une *bobine*; il est possible de disposer un carton convenablement entaillé de manière à partager la section de la bobine en deux moitiés. L'expérience du spectre nous montre alors les lignes de force à peu près rectilignes à l'intérieur (fig. 173).

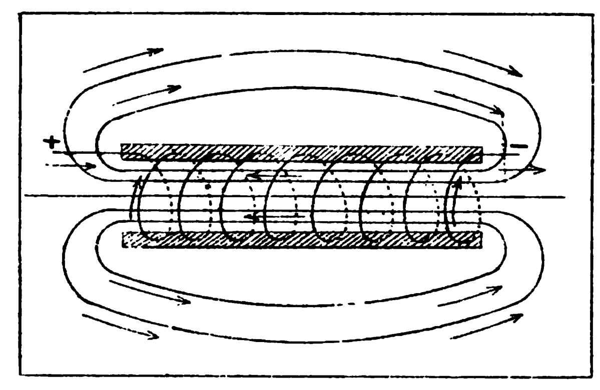


Fig. 173

Vers les extrémités, ces lignes se courbent et contournent ensuite les fils pour se fermer sur elles-mêmes au dehors de la bobine. Si on veut trouver le sens de la force, on personnifie le courant au moyen d'un observateur regardant la partie centrale; sa gauche indique le sens des lignes.

Remarquons que, dans ce cas, le champ est uniforme dans toute la région intérieure non voisine des extrémités.

Généralisation de la loi de Laplace. — Nous avons trouvé que l'action d'un pôle O sur un élément ds placé en A a pour valeur :

$$(1) \qquad df = \frac{mi\,ds \sin \alpha}{r^2}$$

Cette force est dirigée vers la gauche d'un observateur placé dans le fil, recevant le courant par les pieds et tourné dans la direction des lignes de force du pôle.

Or, nous concevons que ce pôle crée un champ magnétique tout autour de lui; l'élément est dans ce champ, et si nous voulons l'*intensité* au point A, nous devons placer en ce point un pôle Nord *unité* et déterminer la force qui s'exerce sur lui. La loi de Coulomb sur les actions magnétiques (page 42) nous donne pour cette action (en prenant K égal à 1) :

$$\mathfrak{F} = \frac{m}{r^2}$$

C'est, au point A, l'intensité du champ créé par O.



On écrit donc, en introduisant $\mathcal{F}$ dans l'expression (1) :

$$(2) \qquad df = i\,ds \times \mathcal{F} \sin \alpha$$

La force $\mathcal{F}$ est dirigée suivant la droite AO. Mais il peut y avoir d'autres pôles que O ; considérons encore O' ; son action élémentaire sur ds est :

$$df' = i\,ds \times \mathcal{F}' \sin \alpha'$$

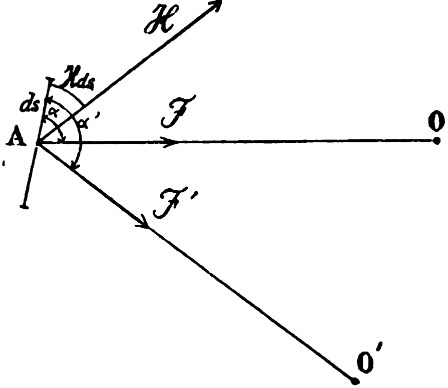


Fig. 174

Si nous appelons $\mathcal{F}'$ l'intensité en A du champ du pôle O' (de direction AO').

L'action de OO' sur ds est donc la résultante de df, df', ou bien, au facteur constant ids près, c'est encore la résultante de $\mathcal{F} \sin \alpha$, $\mathcal{F}' \sin \alpha'$...

Les diverses forces $\mathcal{F}$, $\mathcal{F}'$..... émanant des divers pôles admettent une résultante $\mathcal{H}$ car elles sont toutes appliquées en un même point, et $\mathcal{H}$ est au point A l'intensité du champ de tous les aimants réunis. Cette force fait avec l'élément un angle $(\mathcal{H}\,ds)$ et l'on peut écrire, en appliquant le théorème des projections, que :

$$\mathcal{H} \sin (\mathcal{H}\,ds)$$

est la résultante de $\mathcal{F} \sin \alpha$, $\mathcal{F}' \sin \alpha'$, etc.

Dès lors l'action dF du champ sur l'élément est :

$$d\mathrm{F} = i\,ds\,\mathcal{H} \sin (\mathcal{H}, ds)$$

ce qui généralise la loi de Laplace au cas d'un champ quelconque d'intensité $\mathcal{H}$:

L'action est toujours dirigée vers la gauche de l'observateur tourné dans la direction du champ; elle est proportionnelle à l'intensité du courant, à celle du champ, à la longueur de l'élément et au sinus de l'angle que forme la direction du champ avec l'élément.

Tube et flux de force. — Soit un circuit C placé dans un champ magnétique. Parmi les lignes de force de ce champ, il en est qui traversent C, d'autres rencontrent la courbe elle-même. Considérons ces dernières ; elles constituent les parois d'une sorte de canal que l'on appelle *tube de force*.

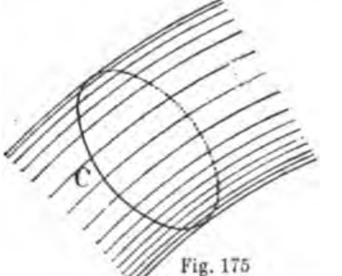


Fig. 175

Les lignes de force contenues dans ce tube nous indiquent la propagation intérieure de ce qu'on nomme le *flux*. Le sens de ce flux est celui des lignes de force.

Voici maintenant comment nous évaluons le flux :

1° Il peut se faire que le champ soit uniforme à l'intérieur du tube. Alors on fait une section droite et on multiplie sa surface par la valeur constante $\mathcal{H}$ de la force en un point. On a :

$$\mathfrak{N} = \mathrm{S} \times \mathcal{H}$$

Ce nombre déterminé obtenu ainsi est encore ce que l'on prend quelquefois pour le *nombre des lignes de force* qui traversent le tube.

On montre qu'il a même valeur quelle que soit la position de la section considérée;

2° Si le champ n'est pas uniforme, cas le plus fréquent, on ne peut opérer comme précédemment, mais on divise le tube en portions suffisamment déliées pour que chacune corresponde à une valeur constante de l'intensité du champ. Alors pour chacun de ces tubes partiels, on calcule le flux, comme on l'a vu précédemment et on fait la sommation ensuite pour obtenir le flux total. Coupons donc le tube orthogonalement aux directions des lignes de force; nous obtenons une certaine surface qui se projette en S (fig. 176). La surface S se partage en éléments infiniment petits quand le tube est divisé comme on l'a dit. Sur *abcd* en particulier, la force a une valeur unique $\mathcal{H}$ aux divers points, étant donné le peu d'étendue *ds* de cette surface. L'élément de flux qui traverse *abcd* est donc :

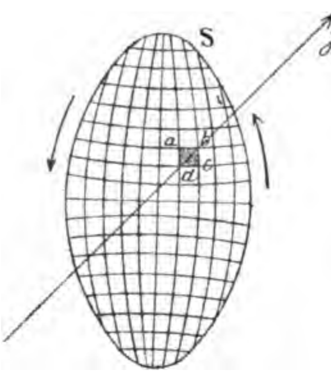


Fig. 176

$$\mathcal{H} \times ds$$

Sur une autre portion de surface *ds'*, la force est $\mathcal{H}'$ d'où un nouvel élément de flux :

$$\mathcal{H}' \times ds'$$

et de même pour tous les autres. Le flux total est donc :

$$\mathfrak{M} = \int \mathcal{H}\, ds,$$

cette sommation étant étendue à toute la surface S.

Ce flux de force qui traverse un circuit donné dépend évidemment de la position du fil dans le champ. Si cette position change, le flux varie et cette variation est intimement liée au travail qui est produit (ou dépensé) dans ce déplacement. Nous allons chercher cette relation.

Travail dû au déplacement d'un courant élémentaire dans le champ magnétique.— Soit l'élément AB; nous savons que l'action *df* du champ sur lui est dirigée vers la gauche d'un observateur tourné dans la direction des lignes de force (page 163).

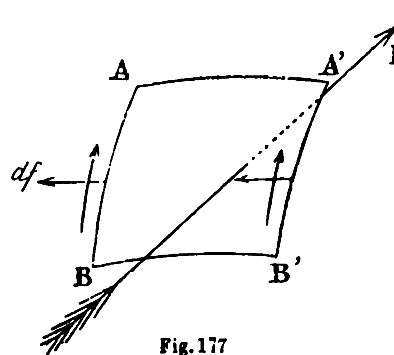


Fig. 177

Si donc nous voulons déplacer le fil de AB en A'B', nous marchons en sens contraire de la force, ce qui *absorbe* de l'énergie; autrement dit il y a du *travail négatif effectué* et nous allons en chercher la valeur.

La translation du conducteur élémentaire engendre une surface ABB'A' à travers laquelle passent des lignes de force. Le flux

traversant cette surface est un *flux coupé* par l'élément. Dans le cas actuel où l'observateur se déplace à *droite*, en sens contraire de la force, nous compterons ce flux *négativement;* il serait pris, au contraire, avec le *signe* + si le mouvement avait lieu dans le sens de la force, c'est-à-dire vers la *gauche*.

D'après cette convention, le travail *produit* dans le mouvement par la force électro-magnétique et le *flux coupé* sont de même signe. On démontre en outre, et nous admettrons ce résultat, que :

Le travail effectué égale le produit de l'intensité du courant par le flux coupé.

Soient : I l'intensité, $d\mathfrak{N}$ le flux coupé (avec son signe); on a un travail :

$$d\mathcal{T} = \mathrm{I} \times d\,\mathfrak{N}.$$

Si $d\mathfrak{N} > 0$, $d\mathcal{T} > 0$; le travail est *produit* par la force électro-magnétique.

Si, au contraire, $d\mathfrak{N} < 0$, $d\mathcal{T} < 0$; le travail est *dépensé* contre la même force.

Travail dû au déplacement d'un circuit fermé dans le champ magnétique. — Soit le conducteur ABCD placé dans un champ; nous le transportons en A'B'C'D'. Dans la première position il est traversé par un certain flux $\mathfrak{N}$; dans la seconde, ce flux devient $\mathfrak{N}'$.

Il s'agit d'évaluer le travail exécuté pendant le transport, en fonction de la variation du flux.

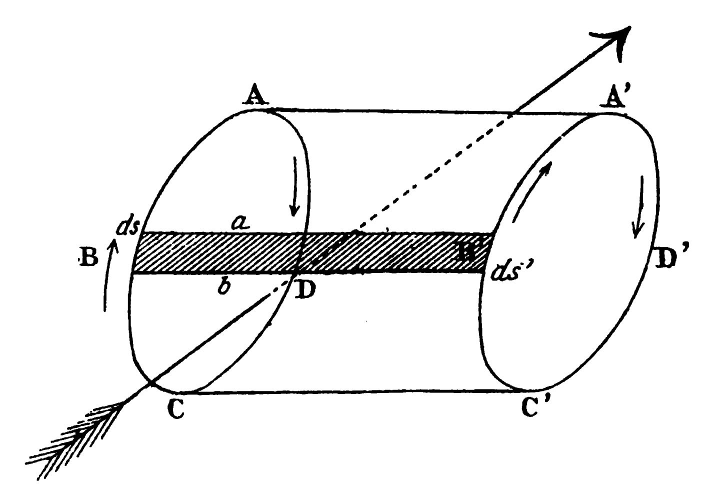


Fig. 178

Considérons la branche CBA; chacun de ses éléments soit ds coupe un flux $d\mathfrak{N}$ correspondant à la surface BB'; il est négatif car ds se déplace vers la droite; le travail produit par ds est donc *négatif* et égal à I $d\mathfrak{N}$.

Il en est de même pour toutes les parties de CBA; donc le travail total *dépensé* dans le déplacement de cette branche entière égale le produit de I par la valeur absolue du flux limité par BA A'B'C' C :

(1) Travail dépensé = I × flux (BAA' B' C'C)

Si nous considérons ensuite la partie ADC, nous voyons qu'elle *produit* réellement du travail, car chaque élément se meut vers la gauche. Ce travail a pour expression :

(2) Travail produit = I × flux (DA A'D'C' C)

En définitive, le travail *effectué* a pour valeur :

(3) $\mathfrak{T}$ = I (flux DAA' D' C' C — flux BA A' B' C' C)

En examinant la figure, on voit que cette différence des deux flux s'exprime autrement : les deux tubes énoncés ci-dessus (3) ont une partie commune AA' B' C' CD et il reste :

(3') $\mathfrak{T}$ = I (flux A'B'C'D' — flux ABCD).

Ainsi le travail obtenu égale le produit de l'intensité du courant par la variation subie par le flux. Si le courant était de sens inverse, on trouverait la même expression changée de signe, et ce signe dépend en outre de la direction du champ. Dans chaque cas, on le détermine aisément. Dans celui que nous avons examiné, le circuit reçoit le flux par la droite d'un observateur d'Ampère tourné vers l'intérieur du circuit. Alors :

$\mathfrak{T}$ = I × variation du flux

Si le courant recevait le flux par sa gauche, on aurait à prendre le signe — devant l'expression. Nous pouvons donc adopter une formule unique et dire :

Le travail engendré dans le déplacement d'un courant dans un champ égale en valeur absolue le produit de l'intensité du courant par la variation du flux de force reçu par le circuit.

Pour avoir le signe du travail on comptera le flux positivement s'il entre par la droite de l'observateur tourné vers l'intérieur et négativement s'il pénètre par la gauche.



CHAPITRE VI

ASSIMILATION DES COURANTS ET DES AIMANTS

Nous avons vu, en étudiant le champ magnétique, quelques analogies des courants et des aimants. Nous allons poursuivre maintenant cette étude au moyen des solénoïdes; nous pourrons ensuite assimiler complètement les aimants aux courants.

Solénoïdes. — On appelle ainsi un assemblage de courants fermés, tous perpendiculaires à une même ligne qui est l'axe, et dirigés dans le même sens.

L'appareil ainsi défini n'est pas réalisable, mais on peut en approcher de la manière suivante : on prend un fil de cuivre isolé enroulé en hélice et on le replie à l'extrémité

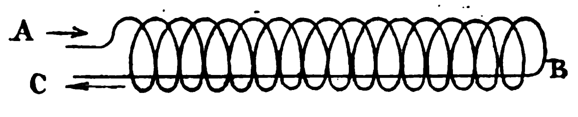


Fig. 179

B jusqu'en C (fig. 179). De cette manière la longueur BC est juste égale à la projection sur l'axe de tous les fils de liaison des diverses spires. On peut alors appliquer le principe des courants sinueux : BC et les fils de jonction se neutralisent; il ne reste alors de l'appareil que les spires circulaires. Nous nous approchons de cette manière du solénoïde théorique.

On peut rendre cet appareil mobile autour d'un axe vertical : le courant est amené par les trois tiges qui plongent dans la cuvette de l'appareil de Bertin; il entre dans le solénoïde par a, le parcourt dans le sens des flèches et en sort par la pointe qui repose dans le mercure (fig. 180).

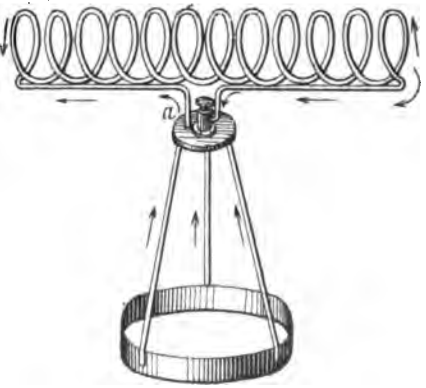


Fig. 180

Munis d'un tel solénoïde et d'un autre fixe, nous allons pouvoir étudier un certain nombre d'actions.

Action de la terre sur un solénoïde. — On lance dans le solénoïde, suspendu comme on l'a vu, un courant assez énergique : l'instrument se met en mouvement et

il se dispose parallèlement à l'aiguille de déclinaison; à la partie inférieure des spires, le courant est alors dirigé de l'est à l'ouest et si on retourne la bobine de 180°, on la voit revenir immédiatement à sa première position. Ainsi un solénoïde est orienté par la terre comme un aimant. L'une des extrémités se tourne toujours vers le nord, l'autre vers le sud, d'où les noms de *pôle Nord* et de *pôle Sud*, que nous donnerons aux extrémités de la bobine.

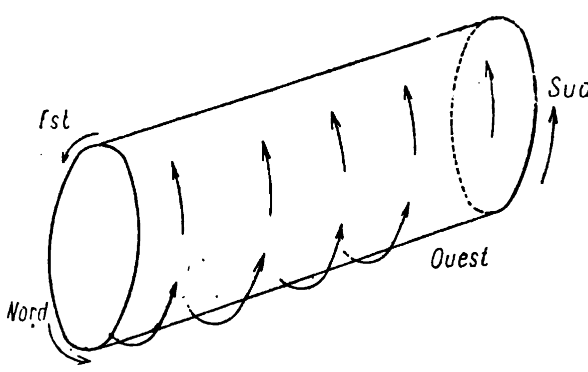


Fig. 181

D'après ce qui a été dit sur la direction du courant, un observateur regardant le pôle Nord voit le courant marcher dans le solénoïde en sens inverse des aiguilles d'une montre, comme l'indique la figure 181.

On peut donc résumer cette action de la façon suivante :

La terre oriente les solénoïdes comme les aimants.

Action mutuelle des aimants et des solénoïdes. — 1° Soit d'abord un *solénoïde mobile*; présentons-lui le pôle d'un aimant; nous observons une attraction ou une répulsion : il y a attraction quand le pôle de la bobine est de nom contraire à celui de l'aimant, et répulsion quand les deux sont de même nom. Ainsi le solénoïde mobile s'est comporté comme une aiguille aimantée.

2° Prenons maintenant une aiguille aimantée mobile et approchons d'un de ses pôles une des extrémités du solénoïde fixe tenu en main ; il y a attraction quand les pôles en présence sont contraires et répulsion s'ils sont de même nom. Voilà une nouvelle circonstance où la bobine agit de la même manière qu'un barreau aimanté. Donc :

Un solénoïde et un aimant exercent l'un sur l'autre des actions de même sens que celles de deux aimants.

Action des courants sur les solénoïdes. — 1° Revenons au solénoïde mobile et disposons parallèlement à lui un courant rectiligne fixe (comme nous avons opéré dans l'expérience d'Œrsted).

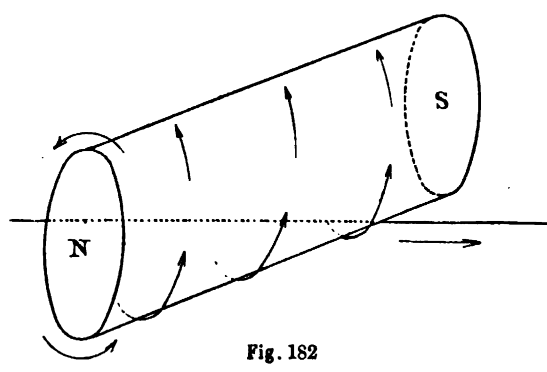


Fig. 182

Le solénoïde se met en croix avec le fil et de plus nous voyons, quand l'équilibre est obtenu, que le courant employé et celui de la bobine sont parallèles et de même sens dans leurs parties voisines (fig. 182). Il est facile de voir que le pôle Nord de la bobine se tient à la gauche de l'observateur d'Ampère

personnifiant le courant rectiligne et regardant la bobine. Nous pouvons d'ailleurs changer la situation du fil et le sens du courant comme dans l'expérience d'Œrsted, et toujours nous déplaçons le pôle Nord à gauche.

2° Nous allons maintenant effectuer une expérience analogue à celle de la page 148 (réciproque de l'expérience d'Œrsted). Prenant en main une bobine fixe nous pouvons la faire agir sur le courant mobile de l'appareil Bertin. Ce courant se déplace et toujours le pôle Nord marque la gauche de l'observateur personnifiant le courant. Donc :

Les actions mutuelles d'un solénoïde et d'un courant sont les mêmes que celles d'un aimant et d'un courant.

Ici encore le solénoïde est l'analogue d'un aimant.

Actions mutuelles des solénoïdes. — Prenons deux bobines l'une fixe, l'autre mobile, traversées par un courant et déterminons tout d'abord les pôles de ces solénoïdes. Présentons ensuite N et S successivement à chacun des pôles de la seconde bobine : le pôle N attire S' et repousse N'.

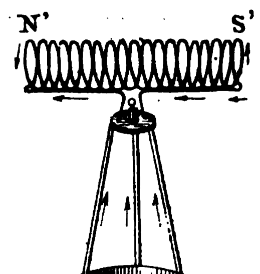


Fig. 183

De même S produit une attraction sur N' et une répulsion sur S'. Ces phénomènes peuvent se prévoir par les lois de l'électro-dynamique : dans la position figurée par exemple, nous avons en N et en S' deux spires voisines de même sens puisque l'un des solénoïdes est la continuation de l'autre; les deux pôles N et S' s'attirent donc bien.

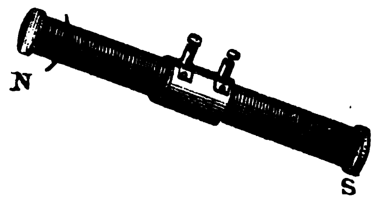


Fig. 184

Ainsi, en résumé, deux pôles de même nom se repoussent; deux de nom contraire s'attirent. Donc :

Deux solénoïdes exercent l'un sur l'autre des actions de même sens que celles de deux aimants.

Théorie du magnétisme d'Ampère. — Si nous rapprochons les résultats qui viennent d'être obtenus, nous voyons, dans tous les cas, un solénoïde agir comme un aimant vis-à-vis : 1° de la terre; 2° d'un aimant; 3° d'un courant; 4° d'un autre solénoïde, cela du moins quant au sens de l'action.

En se basant sur tous ces faits, Ampère a imaginé la théorie du magnétisme qui porte son nom; il attribue les actions magnétiques à des *courants circulaires qui préexistent autour de chaque particule magnétique*. Ce sont les *courants particulaires d'Ampère*. Cette hypothèse doit nous permettre d'expliquer l'état des corps magnétiques non aimantés et l'aimantation par influence.

Si un corps magnétique tel que le fer n'est pas aimanté, c'est que les courants sont orientés dans toutes les directions et que, par suite, leur action résultante est nulle.

Quand on fait usage d'un aimant pour communiquer à ce fer l'aimantation, on oriente ces courants dans un certain sens, qui est le même pour tous (d'après la loi de l'électro-magnétisme) et si on considère une file de particules magnétiques parallèle à l'axe du barreau, elle forme un véritable solénoïde constitué par tous les courants particulaires. L'aimant tout entier est formé par une série de solénoïdes semblables et cet ensemble agit comme une bobine unique : on peut s'en rendre compte sur la figure 185 qui montre les deux pôles d'un aimant en fer à cheval. On voit que, dans les parties voisines, les petits courants marchent en sens inverse et se neutralisent ; il ne reste alors que les courants circulant à la surface même du barreau ; tout se passe comme si l'aimant était un solénoïde unique. Son pôle Nord est identique au pôle de même nom d'un solénoïde. Donc :

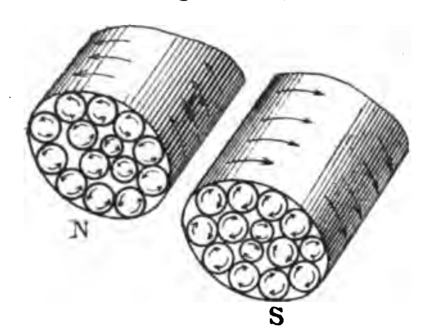


Fig. 185

Un observateur regardant le pôle Nord de l'aimant voit les courants particulaires marcher en sens contraire des aiguilles d'une montre.

Au pôle Sud, les apparences sont opposées.

L'orientation des courants particulaires est très facile dans le fer doux ; elle se détruit si on supprime la cause directrice, comme nous l'avons vu dans l'étude de l'influence magnétique. Au contraire, l'acier permet difficilement cette orientation qui reste acquise au métal une fois qu'elle a été obtenue.

Champ d'un solénoïde. — Nous avons déjà vu quelle est la disposition des lignes de force à l'intérieur d'un solénoïde. Ces lignes, sensiblement parallèles dans la bobine, se ferment sur elles-mêmes au dehors en s'écartant plus ou moins des spires. Ainsi donc le champ peut être considéré comme uniforme à l'intérieur du solénoïde sauf toutefois aux extrémités, où les lignes commencent à se courber.

Nous avons maintenant à chercher le sens des lignes de force. Cette recherche est aisée car nous savons que les lignes vont extérieurement du pôle Nord au pôle Sud. Or le pôle Nord est facilement reconnaissable : c'est celui devant lequel il faut se placer pour voir marcher le courant en sens inverse des aiguilles d'une montre.

Nous arrivons ainsi à déterminer le sens que nous cherchons, dès que la situation des pôles nous est connue, mais nous pouvons obtenir *directement* ce résultat et nous adopterons pour cela la règle de Maxwell :

On suppose un *tire-bouchon* présenté à l'une des extrémités de la bobine (fig. 186) et *on le fait tourner dans le sens du courant qui parcourt les spires : l'instrument se déplace, suivant sa propre direction, dans un sens qui est celui du champ.*

Il s'agit de justifier cette manière de faire ; mettons par exemple, le tire-bouchon en N, pôle Nord ; si nous le faisons tourner dans le sens du courant, nous voyons sortir

la vis et par conséquent nous suivons les lignes de force qui s'échappent de cette extrémité Nord pour aboutir extérieurement à l'autre.

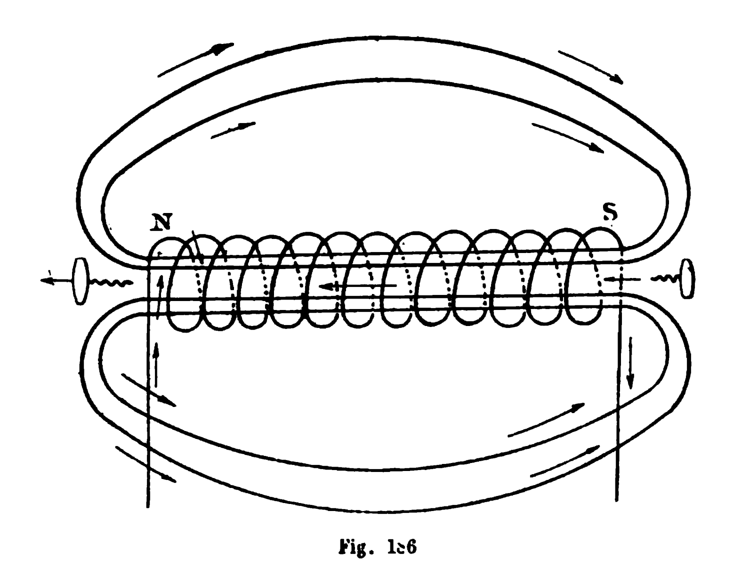


Fig. 186

En S nous voyons un effet contraire; le mouvement de l'électricité est celui des aiguilles d'une montre et par suite la rotation enfonce le tire-bouchon à l'intérieur de la bobine, c'est-à-dire bien dans le sens des lignes de force.

Valeur du flux à l'intérieur d'une bobine. — Nous venons d'indiquer comment on trouve facilement le sens du flux; il nous reste à en fixer la valeur. Cette valeur dépend évidemment de plusieurs choses :

1° De l'intensité du courant qui traverse le solénoïde;

2° Du nombre des spires de cette bobine. Ordinairement on considère le produit $N \times I$ de l'intensité en ampères par le nombre des spires; c'est le *nombre d'ampères-tours.*

Souvent on rapporte ce produit à l'unité de longueur de la bobine. Si l est la longueur totale, l'expression $\frac{N \times I}{l}$ est le *nombre d'ampères-tours par centimètre.*

Le calcul montre que *la valeur du flux intérieur par unité de section s'obtient en multipliant le nombre d'ampères-tours par centimètre par une constante* $\frac{4\pi}{10} = 1,25$, à la condition que la bobine soit de grande longueur. Sinon les extrémités apporteraient des perturbations dont il faudrait tenir compte dans le calcul du flux.

Ainsi, soit une bobine très mince de 20 centimètres de longueur, constituée par 100 tours de fil parcourus par un courant de 10 ampères. Nous avons :

$$\text{Ampères-tours par centimètre : } \frac{100 \times 10}{20} = 50$$

d'où :

$$\text{Flux par unité de section (1)} = 50 \times 1,25 = 62,50.$$

Nous aurons souvent à considérer des bobines d'un autre genre et formées d'un fil enroulé sur un anneau fermé. Une telle disposition est l'analogue d'un aimant annulaire : les lignes de force ne sortent plus au dehors et nous n'avons que des lignes intérieures qui suivent les parois du tube.

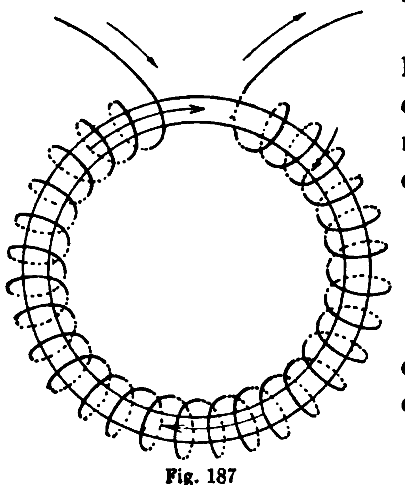


Fig. 187

Il n'y a pas alors de pôles libres, mais la règle de Maxwell ne cesse pas d'être applicable; elle nous donne le sens des lignes de force d'après le mouvement imprimé au tire-bouchon. La figure 187 indique ce sens.

On voit d'après la forme des lignes que le champ est uniforme.

Dans le calcul du flux, nous n'avons pas à tenir compte des extrémités libres de la bobine, attendu que ces pôles n'existent pas ici. La formule indiquée est alors applicable. On a :

$$\text{Flux par unité de section} = 1,25 \times \frac{N\,I}{l}$$

l étant la circonférence moyenne de l'anneau. Ainsi, par exemple, soit une bobine enroulée sur un tore de 10 centimètres de rayon moyen; elle comprend 250 tours et l'intensité du courant y est de 8 ampères. On a :

$$\text{Flux par unité de section} = 1,25 \times \frac{250 \times 8}{2\,\pi \times 10} = 39,79$$

1. Ou encore : *force en un point quelconque*, ou bien : *intensité du champ* au même endroit.

CHAPITRE VII

AIMANTATION PAR LES COURANTS. — ELECTRO-AIMANTS

Expériences d'Arago. — Nous savons que les corps magnétiques s'aimantent sous l'influence des aimants. Dès lors, en vertu de l'assimilation qui vient d'être établie nous pouvons espérer obtenir l'aimantation avec les courants eux-mêmes. Et, en effet, tous les aimants élémentaires de Coulomb, ou, si l'on veut, tous les courants particulaires d'Ampère doivent s'orienter sous l'action de l'électricité de manière à donner au métal les propriétés d'un aimant.

Le fait a été établi expérimentalement par Arago en 1820, l'année même de l'expérience d'Œrsted et des travaux d'Ampère :

1° Il mit en croix une tige de fer doux et un conducteur de cuivre traversé par un courant intense, et put constater l'attraction de la limaille par le fer. Ce phénomène durait autant que le courant, et les pôles de l'aimant nouveau étaient par rapport au courant, placés conformément à la règle d'Ampère;

2° Le fil de cuivre, siège du courant, peut être plongé dans la limaille : on voit les grains métalliques se grouper autour du conducteur et agir les uns sur les autres comme de véritables aimants. Dès que le courant est rompu, les parcelles retombent.

Les phénomènes sont donc analogues à ceux que nous avons rencontrés à propos de l'influence magnétique.

Aimantation du fer doux. — Electro-aimants. — Nous avons vu, dans l'expérience de l'influence (voir page 46) que le fer doux s'aimante instantanément. Il en est de même encore quand nous plaçons ce métal dans le champ magnétique créé par une bobine dans laquelle circule un courant (fig. 188). Nous voyons aussitôt les deux extrémités N et S agir comme deux pôles et le phénomène cesse dès que le courant est interrompu. Quant à la disposition des pôles elle est facile à trouver : un observateur, regardant l'une des extrémités du solénoïde, voit le courant marcher dans le même sens dans toutes les spires; si ce sens est inverse de celui des aiguilles d'une montre, l'observateur a devant lui le pôle Nord; ce pôle est en N.

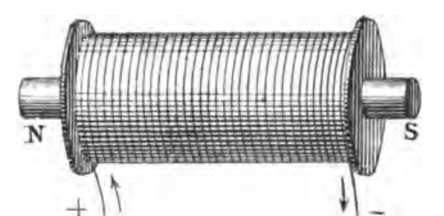


Fig. 188

L'appareil ainsi constitué par un noyau rectiligne de fer entouré d'une bobine est un *électro-aimant*.

La fonte et l'acier doux peuvent remplacer le fer doux. Ces métaux ne diffèrent du premier que par leur perméabilité.

Coefficient de perméabilité magnétique. — Nous avons défini déjà cette propriété que l'on nomme *perméabilité*; il s'agit maintenant de l'évaluer numériquement. Considérons pour cela une bobine de très grande longueur l parcourue par un courant dont nous connaissons l'intensité I. Si le nombre de spires nous est également connu, nous pouvons calculer aisément le flux intérieur. Nous avons en effet, par unité de section :

$$\mathcal{H} = 1{,}25 \frac{\mathrm{NI}}{l}$$

Comme on l'a fait remarquer déjà, cette expression représente ce que l'on désigne indifféremment sous les noms de *flux de force par unité de section*, de *force* en un point intérieur ou d'*intensité du champ* dans la bobine,

Introduisons dans ce solénoïde un morceau de métal magnétique remplissant exactement toute la partie intérieure. Les lignes de force se resserrent aux extrémités, nous accusant, dans le fer, un flux d'induction considérable. Rapportons ce flux d'induction à la section unité; nous avons ce qu'on appelle l'*induction* $\mathcal{B}$. Plus le fer est perméable, plus $\mathcal{B}$ est considérable relativement à $\mathcal{H}$ et nous prenons pour valeur μ du *coefficient de perméabilité* le rapport de ces deux flux qui traversent la même bobine après et avant la disposition du noyau :

$$\mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}}$$

De là nous tirons la valeur de l'induction en fonction de l'intensité $\mathcal{H}$ qui nous est connue :

$$\mathcal{B} = \mu\, \mathcal{H} = 1{,}25 \frac{\mathrm{N.\,I}}{l} \cdot \mu$$

Mais n'oublions pas que cette valeur est calculée pour le cas d'une bobine *très longue*.

Elle est encore applicable, et alors sans restriction, à une bobine annulaire de section quelconque ou à une bobine fermée sur elle-même et de toute autre forme. En effet, dans ces cas, la bobine n'a ni commencement ni fin et tout se passe comme si les extrémités étaient rejetées à l'infini.

Il est évident que le coefficient μ vaut l'unité pour tous les corps non magnétiques quels qu'ils soient : bois, cuivre, etc; leur introduction dans le champ ne change pas la disposition des lignes de force qui parcourent la bobine vide.

La valeur de μ n'est pas la même d'ailleurs pour tous les corps magnétiques, comme on l'a déjà dit et cela se conçoit.

Mais pour un échantillon donné, μ n'est même pas invariable; il dépend de l'induction dans la bobine, comme nous allons le voir.

Voici, à titre de renseignement, des valeurs moyennes de μ en fonction de l'induc-

tion $\mathfrak{B}$ dans des échantillons de fer doux, d'acier doux et de fonte de moulage. Nous remarquerons que :

1° Les trois corps magnétiques considérés diffèrent peu les uns des autres au point de vue de leur composition chimique et malgré cela μ varie beaucoup quand nous passons de l'un à l'autre.

2° Le coefficient μ diminue rapidement quand on augmente l'induction, ce qui nous conduit à cette conséquence : pour obtenir des inductions élevées ($\mathfrak{B}=\mu\ \mathcal{H}$) il faut donner à $\mathcal{H}$ une très grande valeur, c'est-à-dire adopter un nombre très considérable d'ampères-tours.

Dans le tableau ci-dessous, $\mathfrak{B}$ est exprimé en l'unité absolue spéciale, que l'on appelle le *gauss*.

INDUCTION $\mathfrak{B}$ (en gauss)	COEFFICIENT DE PERMÉABILITÉ μ		
	Fer doux	Acier doux	Fonte de moulage
4.000			800
5.000	2.500		500
6.000	2 460		280
7.000	2.440		170
8.000	2.375		100
9 000	2 250		70
10.000	2.000	950	53
11.000	1.690	925	37
12.000	1.410	860	
13.000	1.085	730	
14.000	825	590	
15.000	525	465	
16.000	320	330	
17.000	190	215	
18.000	90	160	
19.000	54		
20.000	30		

Si l'on veut s'en rapporter aux chiffres de ce tableau, il est facile de calculer les éléments des bobines.

Ainsi, soit à établir dans une bobine longue à noyau magnétique, une induction $\mathfrak{B}$. Nous prenons la valeur de μ correspondante et nous en déduisons la force $\mathcal{H}$:

$$\mathcal{H}=\frac{\mathfrak{B}}{\mu}$$

Or :

$$\mathcal{H} = 1{,}25\,\frac{\mathrm{N\,I}}{l}$$

Nous avons donc :

$$\frac{\mathfrak{B}}{\mu} = 1{,}25\,\frac{\mathrm{N\,I}}{l}$$

d'où :

$$\frac{\mathrm{N\,I}}{l} = \frac{\mathfrak{B}}{1{,}25\,\mu}$$

Soit en particulier une induction $\mathcal{B} = 16.000$ à établir dans un noyau de *fer doux;* nous trouvons $\mu = 320$, d'où :

$$\frac{\mathrm{N\,I}}{l} = \frac{16\ 000}{320 \times 1,25} = 40.$$

Le nombre d'ampères-tours par centimètre est 40. Avec une intensité de 10 ampères il nous faut 4 spires par centimètre.

Le même calcul a été fait pour tous les nombres du tableau précédent et on a consigné les résultats $\frac{\mathcal{B}}{1,25\,\mu}$ pour chaque métal et pour chaque induction dans la liste qui suit. On a calculé aussi les ampères-tours par centimètre $\frac{\mathcal{B}}{1,25}$ capables de produire les mêmes inductions dans une bobine dépourvue de métal magnétique.

INDUCTION $\mathcal{B}$ (en gauss)	AMPÈRES-TOURS PAR CENTIMÈTRE : $\frac{\mathrm{N\,I}}{l}$			
	Bobine sans noyau	Noyau fonte	Noyau acier	Noyau fer
1.000	800			
2 000	1.600			
3.000	2.400			
4.000	3.200	4		
5.000	4.000	8		1,6
6.000	4.800	17,1		1,9
7.000	5.600	32,9		2,3
8.000	6.400	64		2,6
9.000	7.200	102,8		3,2
10.000	8 000	150,9	8,4	4
11 000	8.800	237,9	9,5	5,2
12 000	9.600		11,1	6,8
13.000	10.400		14,2	9,5
14.000	11.200		18,9	13,5
15 000	12.000		25,8	22,8
16.000	12.800		38,7	40
17.000			63,2	71,5
18 000			90	160
19.000				281
20.000				533

L'emploi de ce tableau se comprend aisément. Soient les exemples :

1° On veut produire une induction de 8.000 dans un noyau de fonte au moyen d'un courant de 10 ampères. On demande le nombre de spires à enrouler sur le noyau. Le tableau ci-dessus nous indique que, pour obtenir $\mathcal{B} = 8.000$ dans la fonte, il faut par centimètre un nombre d'ampères-tours :

$$\frac{\mathrm{NI}}{l} = 64.$$

Puisque nous prenons I = 10, il vient :

$$\frac{\mathrm{N}}{l} = \frac{64}{10} = 6,4 \text{ (6 tours } \frac{4}{10} \text{ par centimètre)}$$

Si la bobine a une longueur l égale à 50 centimètres, on a :

$$N = 6{,}4 \times 50 = 320 \text{ spires}$$

2° On dispose d'une bobine de 5 spires par centimètre; quel courant faut-il employer pour donner au fer l'induction 16.000?

Le tableau nous dit que pour $\mathcal{B} = 16.000$ dans le fer, il faut :

$$\frac{NI}{l} = 40.$$

Or :

$$\frac{N}{l} = 5\,;$$

on en conclut :

$$I = \frac{40}{5} = 8 \text{ ampères}.$$

Circuit magnétique fermé. — L'expression de $\mathcal{B}$ trouvée précédemment s'applique à deux cas :

1° Bobine de très grande longueur ;

2° Bobine fermée sur elle-même et de longueur quelconque.

Cette dernière constitue un *circuit magnétique fermé*. Exprimons le *flux d'induction* qui traverse ce solénoïde. Nous avons trouvé :

$$\mathcal{B} = 1{,}25 \frac{NI}{l} \mu$$

cela par unité de section; pour toute la section S, il vient :

$$\mathcal{N} = \mathcal{B}S = 1{,}25 \frac{NI}{l} \mu S$$

que nous écrivons encore de la manière suivante :

$$(1) \qquad \mathcal{N} = \frac{1{,}25\, NI}{\dfrac{l}{\mu S}}$$

Force magnétomotrice et réluctance. — Le flux d'induction $\mathcal{N}$ est d'autant plus considérable que le numérateur est plus fort. On donne à ce numérateur le nom de *force magnétomotrice*. Sa valeur est :

$$\mathcal{F} = 1{,}25\, NI$$

C'est le produit du nombre d'ampères-tours par la constante 1,25 ou $\frac{4\pi}{10}$. Ainsi calculée, elle est exprimée en *gilberts*. (Le *gilbert* est l'unité spéciale CGS de force magnétomotrice).

Quant au dénominateur, son expression est analogue à celle de la résistance électrique; on l'appelle *résistance magnétique* ou *réluctance* et on l'exprime au moyen de l'*œrsted*, unité spéciale CGS. On a :

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S}$$

On voit que cette résistance magnétique est proportionnelle à la longueur du circuit et qu'elle est en raison inverse de la section du métal. Enfin, elle dépend du coefficient de perméabilité μ que l'on pourrait encore appeler *conductivité magnétique.*

Valeur du flux d'induction en fonction de $\mathfrak{F}$ et de $\mathfrak{R}$. — Avec les notations exposées, l'équation (1) devient :

$$\mathfrak{N} = \frac{\mathfrak{F}}{\mathfrak{R}} \qquad (2)$$

d'où la loi :

Le flux d'induction dans un circuit fermé est le quotient de la force magnétomotrice par la résistance magnétique du circuit.

On remarque l'analogie de cette règle avec la loi d'Ohm. Nous allons voir maintenant comment il convient de l'appliquer.

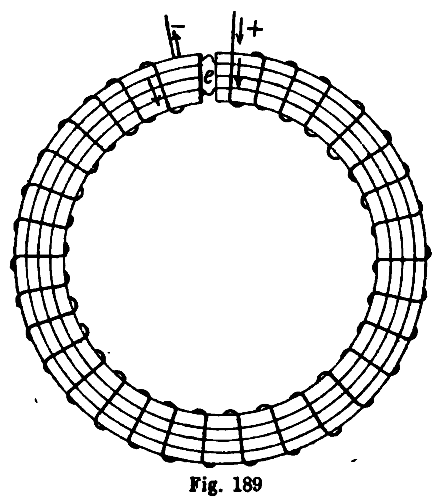


Fig. 189

Il faut avant tout que les lignes de force se conservent en totalité dans toutes les parties du circuit; un anneau fermé réalise cette condition et la formule s'applique sans la moindre difficulté.

Mais nous pouvons supposer une solution de continuité du métal magnétique sans que pour cela les lignes de force se perdent au dehors de la bobine; cet intervalle se nomme *entrefer* (fig. 189). Nous le supposerons de *faible longueur* et constitué par n'importe quelle substance non magnétique : air, bois, cuivre, etc. Son influence n'est que d'augmenter la réluctance du circuit. Appelons :

l la longueur moyenne de tout l'anneau ;
e celle de l'entrefer;
s la section;
μ le coefficient de perméabilité.

La résistance du circuit comprend deux termes : l'un pour le fer, l'autre pour l'entrefer; leurs valeurs respectives sont :

1° Dans le fer. $\dfrac{l-e}{\mu s}$

2° Dans l'entrefer : $\dfrac{e}{s}$

Car $\mu = 1$ pour tous les corps non magnétiques.

On a donc :

$$\mathfrak{R} = \frac{l-e}{\mu s} + \frac{e}{s} = \frac{1}{s}\left(\frac{l-e}{\mu} + e\right) \qquad (3)$$

et alors :

$$\mathfrak{N} = \frac{1{,}25\,\mathrm{NI}}{\frac{1}{s}\left(\frac{l-e}{\mu} + e\right)} \qquad (4)$$

Calcul des électros. — 1° flux constant dans tout le circuit. — Il s'agit d'établir, dans tout le circuit, une induction donnée. Nous avons donc à calculer la force magnétomotrice nécessaire : $\mathcal{F} = 1,25$ NI ou le nombre d'ampères-tours NI.

a) soit un circuit ininterrompu de longueur l ; nous avons :

$$\mathcal{B} = 1,25 \frac{NI}{l} \mu$$

d'où nous tirons :

$$NI = \frac{\mathcal{B}}{1,25 \mu} \times l$$

Le quotient $\frac{\mathcal{B}}{1,25 \mu}$ soit n est le chiffre porté au tableau de la page 174 en regard de l'induction $\mathcal{B}$ à établir dans le métal proposé ; donc le nombre total d'ampères-tours est :

$$NI = n \times l$$

d'où la règle pratique :

Le nombre d'ampères-tours total nécessaire à l'établissement de l'induction donnée égale le produit de la longueur du circuit par le nombre d'ampères-tours par centimètre correspondant à cette même induction (tableau page 174).

Exemple : on désire une induction $\mathcal{B} = 10.000$ dans un noyau de fonte de 25 centimètres.

Nous trouvons au tableau (fonte, $\mathcal{B} = 10.000$) :

$$n = 150,9$$

Le nombre total d'ampères-tours est :

$$NI = n \times l = 150,9 \times 25 = 3772$$

b) soit maintenant le cas d'un circuit magnétique présentant une interruption (fig. 189).

Nous tirons de la formule (4) du paragraphe précédent :

$$1,25\ NI = \frac{\mathcal{N}}{S}\left(\frac{l - e}{\mu} + e\right)$$

Or :

$$\frac{\mathcal{N}}{S} = \mathcal{B}$$

$\mathcal{B}$ étant l'induction à établir dans le circuit ; donc :

$$1,25\ NI = \mathcal{B}\left(\frac{l - e}{\mu} + e\right)$$

et le nombre d'ampères-tours s'exprime par :

$$NI = \frac{\mathcal{B}}{1,25}\left(\frac{l - e}{\mu} + e\right)$$
$$= \frac{\mathcal{B}}{1,25 \mu}(l - e) + \frac{\mathcal{B}}{1,25} e$$

Ce nombre NI est donc la somme de deux termes dont nous connaissons la signification : $\frac{\mathcal{B}}{1,25 \mu}(l - e)$ et $\frac{\mathcal{B}}{1,25} e$.

Le premier terme est le produit du nombre n porté au tableau (page 174) en regard de l'induction $\mathfrak{B}$ par une longueur $l-e$; c'est donc le nombre des ampères-tours nécessaires à l'établissement de l'induction $\mathfrak{B}$ dans le circuit magnétique de longueur $l-e$.

Le deuxième terme de la somme, c'est-à-dire $\frac{\mathfrak{B}}{1.25}e$ est le produit du nombre n' porté au même tableau, en regard de la même induction dans une bobine vide, par la longueur e de l'entrefer.

Nous pouvons donc dire que :

Le nombre des ampères-tours nécessaires à l'établissement de l'induction donnée est obtenu en additionnant les ampères-tours demandés respectivement par la partie magnétique et par la partie non magnétique du circuit.

Nous pouvons aussi adopter la règle pratique suivante dans le calcul de cet électro avec entrefer :

On cherche dans le tableau de la page 174 les nombres n et n' (ampères-tours par centimètre) *correspondant, dans le métal magnétique et dans l'entrefer, à l'induction fixée* $\mathfrak{B}$ *et on les multiplie par les longueurs des segments respectifs*; *la somme des deux produits donne le total des ampères-tours à employer.*

Exemple. : Soit à établir dans un anneau de fer doux de 5 centimètres carrés de section une induction $\mathfrak{B} = 16.000$; la longueur du fer est de 25 centimètres, mais les deux extrémités du métal sont séparées par un vide de 1 millimètre.

D'abord la section n'entre pas en ligne de compte dans notre calcul de NI; elle n'intervient que si on veut fixer la longueur du fil à employer.

Cherchons, dans le tableau, les nombres n et n' correspondant à $\mathfrak{B} = 16.000$; nous trouvons :

Fer :

$$n = 40$$

Entrefer :

$$n' = 12.800$$

chiffres rapportés au centimètre.

Nous obtenons donc :

Ampères-tours demandés par le fer :

$$40 \times 25 = 1.000$$

Ampères-tours demandés par l'entrefer :

$$12.800 \times 0,1 = 1.280$$

Le total des ampères-tours est donc :

$$\text{N I} = 1000 + 1280 = 2.280$$

Si nous disposons d'un courant de 10 ampères, nous devons prendre 228 spires.

On remarque combien est grande l'influence d'un entrefer même petit. Sa longueur

n'égale que la $\frac{1}{250}$ de celle du circuit, et cependant cet entrefer exige plus d'ampères-tours que le métal.

Calcul des électros. — 2° Flux variable. — Supposons que le flux ne se maintienne pas invariable dans les diverses portions traversées, qu'il y ait des dérivations ou d'autres pertes. Nous devons alors changer de formule (de même qu'en électricité nous remplacerions, dans le cas analogue, la loi d'Ohm par celle des courants dérivés).

Nous prendrons, d'une manière générale, trois substances différentes pouvant être magnétiques ou non et dans lesquelles nous voulons établir des flux déterminés

$$\mathfrak{N}, \ \mathfrak{N}', \ \mathfrak{N}''$$

Si les résistances magnétiques de ces portions ont respectivement les valeurs

$$\mathfrak{R}, \ \mathfrak{R}', \ \mathfrak{R}''$$

nous remplacerons l'égalité

$$\mathfrak{F} = \mathfrak{R}\,\mathfrak{N}$$

par la suivante, analogue à la loi de Kirchhoff (courants dérivés).

$$\mathfrak{F} = \mathfrak{R}\,\mathfrak{N} + \mathfrak{R}'\,\mathfrak{N}' + \mathfrak{R}''\,\mathfrak{N}'' \text{ gilberts.}$$

Nous avons d'ailleurs les expressions des réluctances :

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu s}$$

$$\mathfrak{R}' = \frac{l'}{\mu' s'}$$

$$\mathfrak{R}'' = \frac{l''}{\mu'' s''}$$

si nous désignons par $s\,s'\,s''$ les sections des divers tronçons, par $l\,l'\,l''$ leurs longueurs en centimètres et par $\mu\,\mu'\,\mu''$ leurs coefficients de perméabilité.

On a dès lors :

$$\mathfrak{F} = \frac{l\,\mathfrak{N}}{\mu s} + \frac{l'\,\mathfrak{N}'}{\mu' s'} + \frac{l''\,\mathfrak{N}''}{\mu'' s''} \text{ gilberts}$$

Or

$$\frac{\mathfrak{N}}{s} = \mathfrak{B}, \text{ induction dans la première partie ;}$$

$$\frac{\mathfrak{N}'}{s'} = \mathfrak{B}', \text{ induction dans la deuxième partie :}$$

$$\frac{\mathfrak{N}''}{s''} = \mathfrak{B}'', \text{ induction dans la troisième partie}$$

Donc :

$$\mathfrak{F} = \frac{\mathfrak{B}\,l}{\mu} + \frac{\mathfrak{B}'\,l'}{\mu'} + \frac{\mathfrak{B}''\,l''}{\mu''} \text{ gilberts}$$

Si nous appelons NI le nombre total d'ampères-tours :

$$\mathfrak{F} = 1{,}25 \text{ N I}$$

nous avons :

$$NI = \frac{\mathcal{B}}{1,25\,\mu} . l + \frac{\mathcal{B}'}{1,25\,\mu'} . l' + \frac{\mathcal{B}''}{1,25\,\mu''} l''$$

Mais :

$$\frac{\mathcal{B}}{1,25\,\mu} = n$$

nombre d'ampères-tours par centimètre correspondant à l'induction $\mathcal{B}$ dans le premier tronçon.

De même :

$$\frac{\mathcal{B}'}{1,25\,\mu'} = n'$$

$$\frac{\mathcal{B}''}{1,25\,\mu''} = n''$$

d'où un total :

$$NI = l\,n + l'\,n' + l''\,n''$$

On remarque que ln est le nombre d'ampères-tours nécessaire à l'établissement de l'induction voulue dans la première partie du circuit, dont la longueur est l centimètres. De même $l'n'$ et $l''n''$ sont les nombres semblables pour la seconde et pour la troisième partie ; d'où la règle :

Le nombre total des ampères-tours égale la somme des ampères-tours exigés par chacun des segments séparés.

Le mode de calcul à adopter est le suivant :

On cherche les nombres d'ampères-tours par centimètre nécessaires à l'établissement des inductions fixées dans chaque partie (tableau page 174) et on les multiplie par les longueurs des portions correspondantes. La somme de ces produits donne le total d'ampères-tours à adopter.

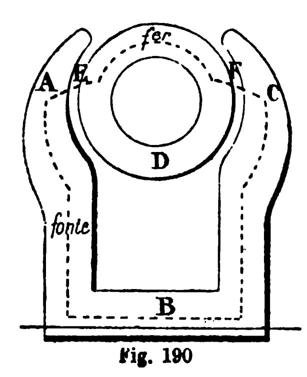


Fig. 190

Exemple : Soit la carcasse d'une dynamo comprenant une pièce ABC en fonte destinée à recevoir les bobines magnétisantes et un anneau D en fer pour supporter l'induit. Entre ces deux métaux, en E et en F, se trouve un intervalle de 1 centimètre, tant pour permettre l'enroulement des fils que pour laisser la pièce centrale libre de tourner autour de son axe. Nous avons donc un circuit magnétique fermé comprenant : fonte, entrefer, fer, avec des longueurs respectives de $l = 90$, $l' = 2$ et $l'' = 40$ centimètres (ces longueurs se mesurent sur un dessin de la carcasse, en suivant l'axe des divers segments).

Les inductions à établir sont données et valent :

$$\mathcal{B} = 8.000 \text{ (fonte)};$$
$$\mathcal{B}' = 5.000 \text{ (entrefer)};$$
$$\mathcal{B}'' = 16.000 \text{ (fer)}.$$

En appelant respectivement n n' n'' les nombres d'ampères-tours par centimètre

nécessaires à l'entretien des inductions $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{B}'$, $\mathfrak{B}''$ dans les diverses substances, nous avons :

$$NI = nl + n'l' + n''l''$$

Le tableau (page 174) nous donne :

$$n = 64 \qquad n' = 4.000 \qquad n'' = 40$$

d'où :

$$NI = (64 \times 90) + (4.000 \times 2) + (40 \times 40) = 15.360 \text{ ampères-tours.}$$

On y arrive au moyen de 1.536 tours et d'une intensité de 10 ampères.

Calcul des circuits magnétiques dérivés. — Voici un autre cas où nous verrons l'analogie des circuits magnétiques et électriques.

Considérons une bobine enroulée sur un noyau de fer AB. Les deux extrémités se bifurquent de manière à former deux circuits complets BCA et BDA ; ce sont des *circuits magnétiques dérivés*. La bobine magnétisante est supportée par la partie AB.

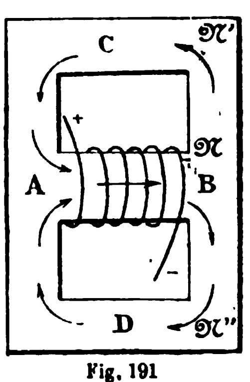


Fig. 191

Pour traiter ce cas, analogue à celui que nous avons rencontré en électricité, nous emploierons les lois de Kirchhoff:

Soient :

$\mathfrak{N}$ le flux dans la partie A B;
$\mathfrak{N}'$ le flux dans la partie BCA ;
$\mathfrak{N}''$ le flux dans la partie BDA.

Les longueurs moyennes de ces parties sont :

$$l \qquad l' \qquad l''$$

et les sections :

$$s \qquad s' \qquad s''$$

Nous pouvons d'abord écrire :

$$(1) \qquad \mathfrak{N} = \mathfrak{N}' + \mathfrak{N}''$$

D'autre part, à chacun des circuits fermés ABCA et ABDA, nous pouvons appliquer la loi déjà utilisée :

$$(2) \qquad \mathfrak{F} = \mathfrak{N}\,\mathfrak{R} + \mathfrak{N}'\,\mathfrak{R}'$$

$$(3) \qquad \mathfrak{F} = \mathfrak{N}\,\mathfrak{R} + \mathfrak{N}''\,\mathfrak{R}''$$

en désignant par $\mathfrak{F}$ la force magnétomotrice, c'est-à-dire le produit par 1,25 du nombre d'ampères-tours de la bobine magnétisante.

Des équations (2) et (3) nous tirons cette conclusion que les flux $\mathfrak{N}'$ et $\mathfrak{N}''$ sont inversement proportionnels aux résistances $\mathfrak{R}'$ et $\mathfrak{R}''$ correspondantes. Ces résistances $\mathfrak{R}$ $\mathfrak{R}'$ $\mathfrak{R}''$ sont faciles à évaluer; nous avons en effet :

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu\, s}$$

$$\mathfrak{R}' = \frac{l'}{\mu' s'}$$

$$\mathfrak{R}'' = \frac{l''}{\mu'' s''}$$

Nous avons ainsi trois relations qui nous permettent de résoudre ce problème des circuits magnétiques dérivés.

Nous verrons plus tard un certain nombre d'appareils ayant recours à des circuits de ce genre : dynamos, transformateurs, etc.

Remarque : Nous venons de traiter le cas de dérivations voulues et calculables. Dans la pratique, des dérivations s'établissent d'elles-mêmes, par le voisinage de masses magnétiques un peu considérables; et ces pertes sont surtout à craindre dans le cas des inductions de grande valeur, car la perméabilité du circuit diminue alors (voir tableau page 173) et la résistance relative à l'entrefer est ainsi moins grande.

Formes diverses des électros. — Dans l'*électro-aimant* représenté (fig. 188) le flux magnétique doit retourner par l'air d'un pôle à l'autre. Cela représente une résistance très considérable d'où un affaiblissement du flux, accentué encore par les dérivations qui se produisent.

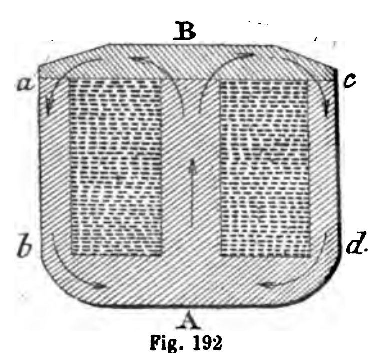


Fig. 192

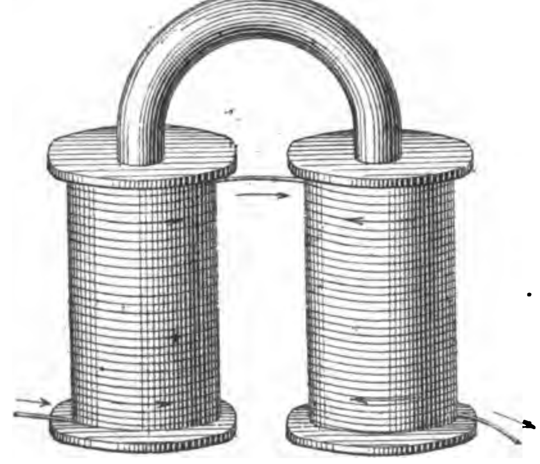
On a donc intérêt à constituer des circuits fermés et on y arrive par différents moyens.

Si l'on tient à conserver la forme rectiligne, on peut fermer le circuit au moyen d'une gaine de fer *abcd* reliée au noyau par une culasse de fer A.

Le noyau et l'enveloppe se terminent dans un même plan *ac*. On applique contre ces pièces un morceau de fer B, *armature* de l'électro (fig. 192).

Avec cette disposition, l'un des pôles est formé par le noyau; l'autre de forme annulaire est l'enveloppe de fer *ac*. Pour de faibles intensités de courant, il n'y a aucun inconvénient à opérer ainsi, mais il n'en est plus de même pour les courants intenses, car la déperdition de


la chaleur du fil est rendue difficile.


Fig. 193

Le plus souvent, quand l'électro doit attirer des corps magnétiques, on partage la bobine en deux parties ; on forme ainsi les *électro-aimants en fer à cheval* ou les *électros à culasse*.

Pour le premier genre, le noyau est simplement recourbé sur lui-même, de

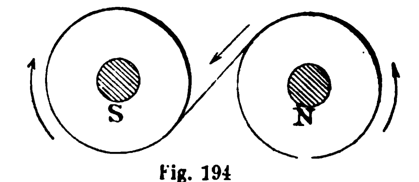


Fig. 194

manière à présenter la forme d'un U et on enroule un des tronçons de la bobine sur chaque branche. L'une des moitiés n'est que la continuation de l'autre et, de cette

manière, un observateur regardant les deux pôles, voit le courant marcher dans deux sens différents aux deux extrémités. On a figuré (194) le mode d'enroulement.

Dans la disposition *à culasse*, il y a trois pièces distinctes : les deux noyaux et la culasse AB qui sont réunies par soudure ou par boulons en A et en B (fig. 195).

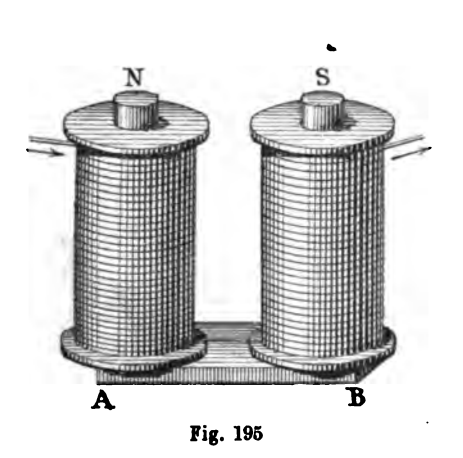


Fig. 195

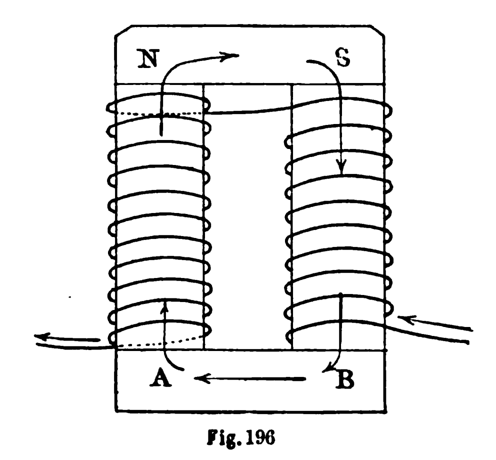


Fig. 196

Dans les deux cas les extrémités des noyaux sont parfaitement dressées et on doit appliquer contre elles une pièce, encore en fer, et destinée à fermer le circuit sur lui-même ; c'est l'*armature*. On voit (fig. 196) le sens du flux magnétique. Pour que l'armature ait toute son efficacité, il faut éviter le moindre entrefer dans le circuit et examiner avec attention les joints à ce point de vue.

Force portante d'un électro-aimant. — Il peut être utile de calculer le poids supporté par l'appareil. Supposons qu'il s'agisse d'un circuit magnétique fermé par une armature. Quant à la forme même, nous choisirons le fer à cheval qui est plus sûr au point de vue de la continuité du flux :

Le poids supporté dépend de plusieurs éléments :

1° De l'induction magnétique ;

2° De la section des noyaux.

Appelons toujours $\mathcal{B}$ l'induction, et S la surface de contact du barreau et de l'armature.

Le calcul montre que la force portante est donnée par la formule :

$$P = \frac{\mathcal{B}^2 S}{8\pi}$$

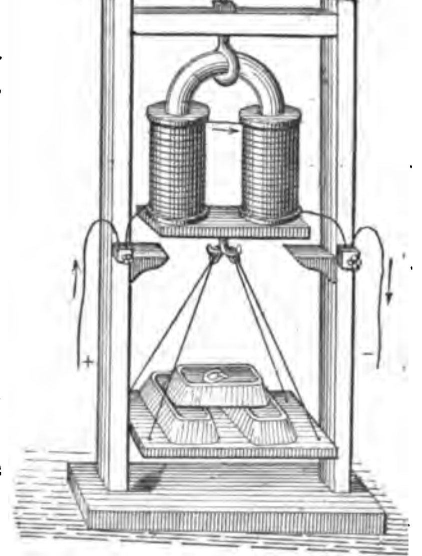


Fig. 197

$\mathcal{B}$, calculé comme on l'a vu précédemment, est exprimé en unités CGS ou gauss.

S doit être donné en centimètres carrés.

P alors est obtenu en dynes.

Si nous voulons le poids porté en grammes, nous devons diviser le résultat précédent par le nombre g ou 981, valeur de l'accélération de la pesanteur. On a donc :

$$P = \frac{\mathfrak{B}^2 S}{8\pi g}$$

Nous savons que $\mathfrak{B}$ dépend du nombre d'ampères-tours par centimètre :

$$\mathfrak{B} = f\left(\frac{NI}{l}\right)$$

On doit donc, pour appliquer la formule, chercher dans la table spéciale (page 174), la valeur de $\mathfrak{B}$ qui correspond au nombre $\frac{NI}{l}$, et la porter dans l'expression précédente.

Fixons les idées par un exemple :

Soit un électro en fer à cheval, de 25 centimètres de longueur totale, armature comprise (comptée suivant les axes) et de 2 centimètres de diamètre. Il reçoit 500 tours d'un fil traversé par un courant de 4 ampères. Nous avons :

$$\frac{NI}{l} = \frac{500 \times 4}{25} = 80.$$

Le tableau nous donne pour :

$$\frac{NI}{l} = 71{,}5 \qquad \mathfrak{B} = 17.000$$

$$\frac{NI}{l} = 160 \qquad \mathfrak{B} = 18.000$$

Ainsi pour une augmentation de :

$$160 - 71{,}5 = 88{,}5$$

ampères-tours par centimètre, l'induction varie de 1.000 au-dessus de 17.000; pour :

$$80 - 71{,}5 = 8{,}5$$

la variation est :

$$\frac{8{,}5 \times 1.000}{88} = 96$$

donc :

$$\mathfrak{B} = 17.096$$

La section d'un noyau est π, mais les deux pôles agissent ensemble ; la surface S est donc 2π et il vient :

$$P = \frac{\overline{17.096}^2 . 2\pi}{8\pi \times 981} = \frac{\overline{17.096}^2}{4 \times 981} = 74.483 \text{ grammes}.$$

Cela représente près de 12 kilogrammes par centimètre carré. Généralement on ne dépasse pas 10 kilogrammes.

On donne ordinairement aux électros une forme ramassée pour réduire autant que possible la longueur du circuit.

Pour régler le nombre d'ampères-tours, on peut se trouver embarrassé, car si on multiplie le nombre de tours, il faut allonger le fil et en même temps réduire son

diamètre, pour ne pas dépasser un certain volume de matière. Alors l'intensité du courant diminue et fait décroître le produit NI.

Le plus souvent la résistance intérieure de l'électro est établie de façon à égaler celle du circuit extérieur. Cette dernière étant donnée, il est facile de calculer la longueur et la section du fil, si on se fixe d'autre part le volume total du conducteur. Ainsi dans le cas d'un électro-aimant placé dans un circuit résistant, un prend un fil long et fin. Alors N est grand aux dépens de l'intensité. On fait le contraire si l'on doit mettre l'appareil sur un fil de faible résistance.

Nous avons supposé des circuits magnétiques fermés. Dans certains cas, il n'en est pas ainsi. Quelquefois l'appareil a pour but l'attraction d'une pièce de fer située à une certaine distance de la bobine. Alors la résistance devient considérable et il faut compenser cet effet par un accroissement de la force magnétomotrice. On augmente, en général, le nombre de spires de la bobine. Cela produit bien un allongement des noyaux, mais la résistance introduite de ce chef n'est pas très importante, étant donnée la grande perméabilité du fer. Les électro-aimants des télégraphes sont tous dans ce cas : ils ont une assez grande longueur.

Quand on veut obtenir des déplacements considérables (et cela se présente dans beaucoup d'appareils de régulation), on utilise l'attraction d'un noyau de fer doux à l'intérieur d'une bobine. Le cylindre métallique est présenté à l'entrée du solénoïde ; il tend à s'y enfoncer et à se placer dans une position symétrique par rapport à toute la bobine.

Si on exerce une action antagoniste, on empêche le déplacement complet du noyau et son enfoncement dépend alors de l'intensité du courant employé.

Électro-aimants de fonte et d'acier doux. — La fonte peut remplacer le fer dans la construction des noyaux d'électro, mais sa perméabilité est inférieure à celle du fer, d'où une moins grande valeur de l'induction et de la force portante, toutes choses étant égales. Si l'on veut obtenir les mêmes effets, il faut donc faire croître le nombre d'ampères-tours, soit par une augmentation de l'intensité du courant, soit par un enroulement plus serré du fil.

Nous avons consigné dans le tableau de la page 174 les nombres d'ampères-tours par centimètre nécessaires pour établir une induction donnée. Soit, par exemple, à produire une induction égale à 10.000. Si le noyau est en fer doux, le nombre d'ampères-tours est 4 ; une seule spire suffit avec un courant de 4 ampères ; si le noyau est en fonte, le nombre d'ampères-tours est bien plus considérable ; on trouve 150,9, soit pour l'intensité 4 ampères, un nombre de spires égal à :

$$\frac{150,9}{4} = 38 \text{ environ.}$$

D'après cela, on ne fait usage des électros de fonte que dans des cas spéciaux, notamment dans la construction de certaines dynamos qui se coulent d'un même jet : bâti, noyaux d'électros, etc.



Comme maximum de force portante, on compte sur 2 kilogrammes environ par centimètre carré.

Quant à l'acier doux, il a pour des inductions faibles et moyennes un coefficient de perméabilité plus petit que celui du fer, mais il devient plus perméable que le fer pour les inductions considérables; il présente alors un grand avantage sur le métal pur en ce qu'il peut être coulé.

Saturation magnétique. — Nous avons déjà dit dans l'étude du magnétisme qu'il existe un certain état d'aimantation maxima, état qu'on ne peut dépasser. Les procédés d'aimantation que nous connaissons maintenant nous permettent de préciser. Il est possible de construire la courbe du magnétisme; nous pouvons, par exemple, pour mener cette ligne, porter sur un axe horizontal les forces magnétisantes $\mathcal{H}$ et sur l'autre axe les inductions $\mathcal{B}$.

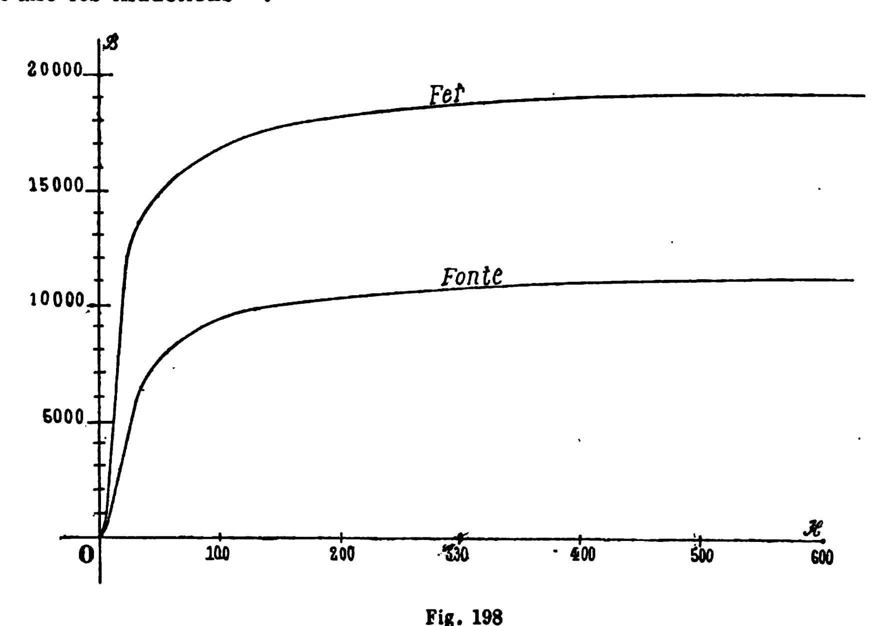


Fig. 198

La figure 198 montre deux de ces courbes, l'une pour un fer doux, l'autre pour une fonte. Toutes deux présentent même allure : elles montent rapidement puis la croissance se ralentit et l'ordonnée semble tendre vers une limite, qui n'est pas la même pour les deux métaux étudiés. Cette limite est la *saturation magnétique;* elle vaut pour le fer employé 20.000 gauss environ, pour la fonte 11.000. Mais les métaux magnétiques sont, à ce point de vue, très différents les uns des autres. Certains fers de Suède, le fer de Lowmoor et quelques autres employés dans la construction des dynamos atteignent des inductions très supérieures à celle que nous avons indiquée ($\mathcal{B}$ = 45 000 gauss pour certains fers de Lowmoor).

Travail d'aimantation. — Supposons que la courbe du magnétisme soit construite en portant (fig. 199) :

1° En abscisses les nombres d'ampères-tours par centimètre;
2° En ordonnées les inductions $\mathcal{B}$.

Cela posé, nous considérons un centimètre cube du métal magnétique auquel la courbe se rapporte et nous lui communiquons progressivement l'induction $\mathcal{B} = OA$ au moyen d'un nombre d'ampères-tours atteignant OB.

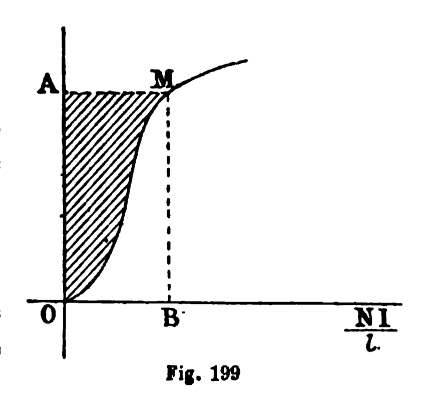


Fig. 199

Cette opération nécessite une certaine dépense d'énergie; on démontre, et nous l'admettrons, que cette énergie est proportionnelle à l'aire OAM comprise entre la courbe, l'axe des $\mathcal{B}$ et la parallèle AM à l'axe des ampères-tours. Ce travail n'est pas exprimé en *ergs* parce que l'*ampère* n'est pas l'unité *absolue* d'intensité et si nous voulons le nombre d'ergs, nous avons à diviser la surface par 10; d'autre part nous savons que 1 joule $= 10^7$ ergs, donc finalement la dépense *en joules* exigée par l'aimantation d'un centimètre cube du métal considéré sera de:

$$\frac{\text{Surface OAM}}{10^8}$$

Cycles magnétiques fermés. — Prenons un morceau de fer et soumettons-le à des forces magnétisantes de sens alternés. Il est évident que le magnétisme du fer va chaque fois changer, mais nous savons déjà que le phénomène magnétique retarde sur le champ en vertu de l'*hystérésis*.

Nous représenterons les états du fer par une courbe : abscisses, ampères-tours par centimètre; ordonnées, inductions.

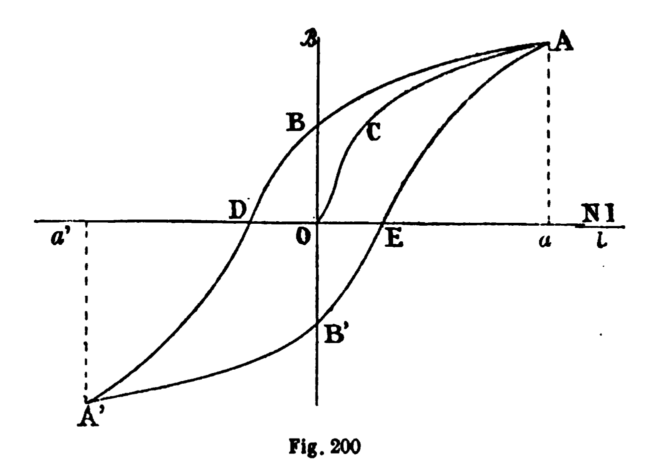


Fig. 200

Nous partons de l'état neutre en l'absence du courant; la courbe part donc de l'origine, puis l'intensité croissant jusqu'à un certain maximum I $\left(\frac{NI}{l} = Oa\right)$ l'induction augmente jusqu'à Aa.

A partir de ce moment, nous diminuons l'intensité d'une façon continue jusqu'à zéro : l'induction décroît suivant les ordonnées de la courbe AB (qui ne se confond pas avec la courbe d'aimantation OCA); il arrive même que $\mathcal{B}$ a encore la valeur OB quand le courant est annulé.

Dès l'instant actuel, le sens de l'électricité est renversé et l'intensité du nouveau courant augmente progressivement jusqu'à la valeur atteinte précédemment, dans le sens différent; les ampères-tours croissent jusqu'à Oa'. Pendant ce temps le magnétisme du barreau décroît; il finit par s'annuler pour une intensité suffisante I' $\left(\frac{NI'}{l} = OD\right)$ et ensuite prend le sens opposé au premier (partie DA' de la courbe).

Quand le maximum d'intensité est obtenu, on diminue le courant jusqu'à zéro, puis on le ramène à sa valeur maxima dans le premier sens. Nous retournons ainsi au point A, mais au moyen de la courbe A'B'EA. Nous voyons encore que le magnétisme n'est pas supprimé quand le courant est annulé pour la seconde fois (point B'). Il reste une induction égale à OB'.

Le même cycle peut être parcouru un certain nombre de fois; il est représenté par la courbe fermée ABDA'B'EA.

Magnétisme rémanent. — La considération du cycle magnétique nous permet d'évaluer le *magnétisme rémanent.* Nous savons déjà qu'il reste toujours dans le métal soumis à l'induction (provenant d'un aimant) une certaine dose de magnétisme après la cessation de la cause. L'induction due au courant provoque le même effet et nous venons de voir qu'il reste une induction OB dans le fer après la destruction du courant. Cette valeur OB peut servir à évaluer le *magnétisme rémanent*; il faut toujours avoir soin de spécifier en même temps la grandeur maxima atteinte par l'induction.

Quant à la longueur OD (ampères-tours par centimètre nécessaires à la suppression complète du magnétisme), elle représente la *force coërcitive.*

Hystérésis. — Perte d'énergie qui en résulte. — L'hystérésis est le retard du phénomène magnétique sur la force magnétisante. Ce retard entraine la perte d'une certaine quantité d'énergie. Nous allons nous proposer de calculer ce travail perdu en le rapportant à un centimètre cube de métal magnétique et à un cycle entier.

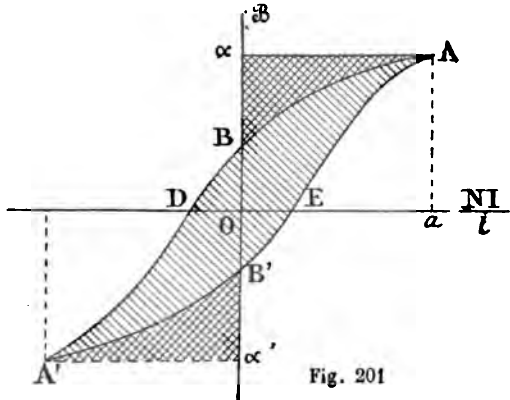


Fig. 201

Parcourons donc le cycle complètement en partant d'un point quelconque auquel nous devrons revenir pour terminer notre opération. Choisissons le point B' à partir duquel nous aimanterons le fer par un courant croissant; le travail *dépensé* pour atteindre l'état maximum (point A) est (voir page 187)

proportionnel à l'aire B' EA α B'. Cette surface est hachée dans un sens donné sur la figure 201. De A en B a lieu une désaimantation qui *rend disponible* l'énergie figurée par l'aire A α B (hachée en sens contraire du premier). En somme, le parcours B'AB nous a déjà *coûté* une énergie représentée par la portion de fuseau B'EABB', Dès que le point B est dépassé nous *employons* pour l'aimantation, contraire à la première, une énergie BA' α' B (hachures indiquant *dépense*) et enfin, de A' en B', la désaimantation nous *rend* A' α' B' (hachures contraires). Donc, le passage de B à B' par A' nous *coûte* une énergie proportionnelle à la seconde partie du fuseau, soit A'B'BA'.

La *dépense* totale est donc *proportionnelle* à l'aire du fuseau entier. Nous dirons :
La perte par hystérésis rapportée à un centimètre cube de métal et à un cycle égale en ergs le 1/10 de la surface du fuseau et en joules le quotient de cette même surface par 10^8.

Cette perte dépend essentiellement de la qualité du métal magnétique; pour le même corps elle est liée à l'induction maxima du cycle. La composition chimique du métal ne renseigne pas sur la valeur de la perte par hystérésis. C'est une grandeur à mesurer pour chaque échantillon, car il est important de n'admettre, dans la construction de certaines machines électriques, que des fers possédant le minimum d'hystérésis. Non seulement cette propriété entraîne une perte de travail mais en outre le fer s'échauffe, ce qui est toujours un grave inconvénient comme nous le verrons.

Voici pour donner une idée de la grandeur de la perte, quelques chiffres obtenus par Ewing; ce sont les moyennes d'un certain nombre de résultats; elles se rapportent à 1 centimètre cube de fer et à un cycle; les chiffres sont exprimés en ergs et ils sont relatifs à des tôles de fer très doux.

Induction $\mathfrak{B}$	Perte par hystérésis
1.000	97
2.000	295
3.000	585
4.000	936
5.000	1248
6.000	1716
7.000	2184
8.000	2808
9.000	3354
10.000	3967

Pour fixer les idées sur le calcul de la perte totale, considérons un anneau de 50 centimètres de circonférence moyenne et de 20 centimètres carrés de section. Le courant qui l'entoure a une fréquence égale à 100 et l'induction entretenue dans le fer est de 8.000 gauss.

Le volume de l'anneau est approximativement :

$$50 \times 20 = 1.000$$

Or, la perte est de 2.808 ergs par cycle et par centimètre carré ; nous avons donc par seconde une somme d'énergie absorbée :

$$2.808 \times 1.000 \times 100 = 280.800.000 \text{ ergs}$$
$$= 28{,}08 \text{ joules.}$$

ce qui correspond à une puissance de 28,08 watts.

Usages des électro-aimants. — Ces appareils servent dans une foule de circonstances :

1° Pour obtenir des champs magnétiques puissants. Tel est le cas des dynamos et des moteurs électriques. Le courant doit, bien entendu, être continu, et les noyaux sont munis, à leurs extrémités, de pièces polaires destinées à donner aux lignes de force une direction déterminée ;

2° Quand on utilise les électros pour leur force portante, on adopte ordinairement la forme en fer à cheval, avec une armature s'appliquant exactement contre les extrémités des noyaux ;

3° Nous rencontrerons encore les électro-aimants dans bien des appareils de régulation pour machines, pour lumière, etc. ;

4° Dans tous les télégraphes, la pièce essentielle est un électro. Alors on utilise surtout l'existence temporaire de l'aimantation plutôt que la force portante et il faut du fer parfaitement doux comme noyau. Ce métal doit être le moins possible travaillé au marteau, car cette opération s'oppose à la désaimantation immédiate. On rejette alors, pour cette raison, les électros courbés pour adopter les appareils à culasse. En outre, les pièces sont recuites à plusieurs reprises. Si l'on veut d'ailleurs éviter complètement le magnétisme rémanent, on ménage, entre le contact et les noyaux, un entrefer quelconque : feuille de papier, carton, métal non magnétique, ou encore couche d'air, en empêchant, par des butoirs, le contact immédiat des noyaux et de l'armature.

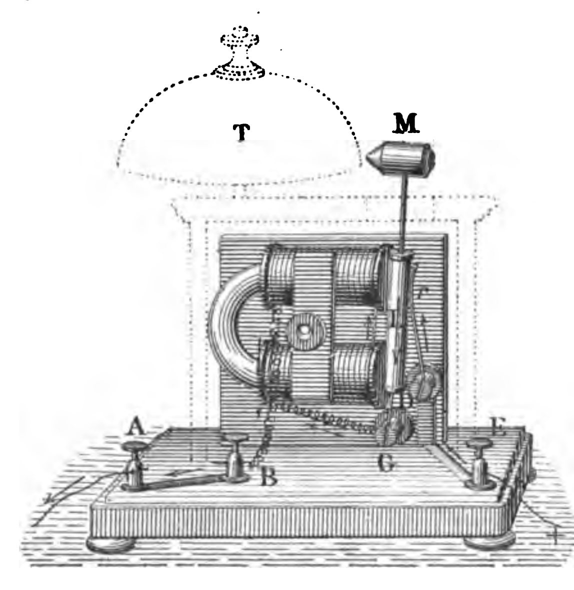


Fig. 202

Nous décrirons, pour le moment, un petit appareil que nous n'aurions plus l'occasion de rencontrer dans la suite : la sonnerie électrique.

La figure 202 représente un des modèles : le courant passe dans un électro fixé à une planchette verticale. Devant les pôles est disposée une pièce de fer doux maintenue dans sa position par un ressort et portant le marteau M. Elle touche alors le contact *r*.

La figure montre le sens du courant électrique. De la borne E il passe au contact *r* et à la pièce de fer L, parcourt les bobines et en sort ensuite par les bornes B, A.

Quand le courant passe, le fer du noyau s'aimante et attire à lui l'armature, d'où un choc sur le timbre. Mais aussitôt le courant est rompu entre L et *r*. Dès lors l'attraction cesse et le ressort éloigne le marteau du timbre. Puis une nouvelle action se produit, semblable à la première, et ainsi de suite.

On commande la sonnerie à distance en installant un circuit complet comprenant une source électrique, pile ordinairement, la sonnerie et un interrupteur permettant de lancer le courant au moment voulu. Tant que le contact est établi, la sonnerie fonctionne.

Aimantation de l'acier. — Nous avons vu l'aimantation du fer se produire instantanément et cesser de même.

Dans le cas de l'acier, les phénomènes diffèrent un peu ; l'opération est lente, et quand la propriété a été communiquée à un barreau, elle lui reste acquise, même après la cessation du courant.

Quant à la disposition des pôles, elle est la même que dans le fer doux ou dans la fonte. Le pôle Nord se trouve du côté où un observateur doit se placer pour voir marcher le courant en sens inverse des aiguilles d'une montre. Ordinairement, pour aimanter l'acier, on place la pièce suivant l'axe d'un tube de verre et on enroule sur ce tube le fil parcouru par le courant électrique (fig. 203).

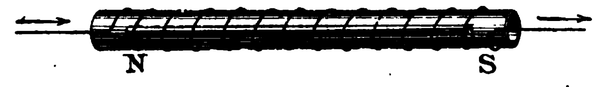


Fig. 203

Le verre n'exerce aucune influence sur le phénomène, mais il faut bien se garder d'employer un métal même non magnétique, car on aurait, dans ce cas, des phénomènes d'induction (voir plus loin).

Si on le désire, on peut former, entre les deux extrémités du barreau, des pôles intermédiaires, ce qu'on appelle des *points conséquents;* il suffit de changer, à un endroit donné, le sens de l'enroulement du fil. Ainsi, la figure 204 nous montre en S



Fig. 204

un pôle Sud, puis un autre opposé N'. De cette manière, les divers pôles sont toujours, comme on le voit, alternés.

L'aimantation de l'acier se fait quelquefois d'une manière un peu différente : on forme une bobine creuse dans laquelle en envoie le courant et on passe le barreau d'acier dans la partie centrale ; partant alors du milieu de la longueur, on imprime à

la bobine un mouvement de va-et-vient de façon à parcourir les deux moitiés un nombre égal de fois. Les pôles se disposent toujours de la même manière (fig. 205).

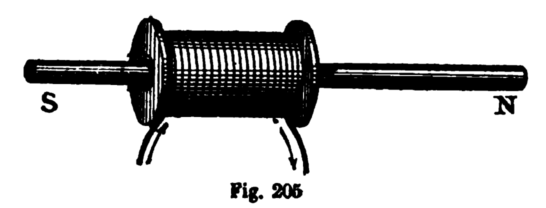


Fig. 205

Quand il s'agit d'un aimant en fer à cheval, on fait une bobine double comme celle des électros de même forme. On engage chaque branche de la pièce d'acier dans une des parties vides et on déplace cette bobine le long des barreaux, comme on l'a fait précédemment (avec une bobine simple).

Les deux extrémités deviennent ainsi des pôles opposés.

L'aimantation par l'électricité est aujourd'hui à peu près exclusivement adoptée.

Le phénomène se produit également par les décharges, ce qui explique certains effets connus depuis longtemps : aimantations ou désaimantations par la foudre, dans le voisinage des points frappés.

Corps diamagnétiques. — Si on approche d'un aimant ou d'un électro à deux branches une petite aiguille mobile en fer, en nickel, en cobalt, on la voit tourner et s'orienter suivant la droite qui réunit les deux pôles. Mais si l'aiguille présentée est en bismuth, elle se met en croix avec la ligne des pôles : un tel corps est appelé *diamagnétique;* il est donc repoussé par les corps aimantés. On explique le phénomène en disant que ce corps est moins magnétique que l'air lui-même. Alors c'est l'air qui prend la direction N S de préférence à cette autre substance qui est chassée dans la position rectangulaire.

CINQUIÈME PARTIE

COURANTS D'INDUCTION

CHAPITRE PREMIER

INDUCTION DANS LES CONDUCTEURS LINÉAIRES

Définition et Classification des phénomènes. — Nous savons qu'un circuit fermé *exige* ou *produit*, selon les cas, de l'énergie quand on le déplace dans un champ magnétique. Nous pourrions nous demander quel est le résultat de ce travail mis en jeu : le raisonnement et l'expérience nous indiquent que ce fil devient le siège de courants électriques de durée égale à la variation qui les engendre. Nous avons là un moyen de produire l'électricité aux dépens du travail. Ces courants s'appellent *induits* ou *courants d'induction.*

Ils ont été découverts par Faraday, en 1831, mais ils n'exigent pas forcément un déplacement des conducteurs. En effet, le travail est intimement lié à la variation du flux de force. Toutes les fois que nous modifierons le flux reçu par un circuit, nous produirons un courant induit.

Nous pouvons donner la définition suivante :

Les courants induits sont ceux qui prennent naissance dans un conducteur fermé placé dans un champ magnétique lorsqu'on produit, d'une manière quelconque, une variation du flux d'induction reçu par le circuit.

Ce flux dépend évidemment de deux choses : de la position du circuit et de la valeur du champ magnétique.

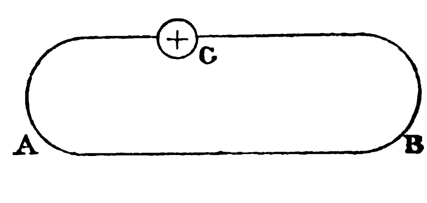
Nous pouvons dès lors le modifier, soit en déplaçant le conducteur fermé, soit en faisant varier le champ.

Il y a donc deux manières essentiellement différentes de produire l'induction.

Quant à la formation du champ, nous pouvons employer, soit un courant, soit un aimant, soit enfin la terre elle-même.

Nous partagerons l'étude du sujet qui nous occupe en trois parties : *induction par les courants*, *par les aimants* et *par la terre;* nous ferons même une quatrième classe des phénomènes pour le cas où le même circuit est à la fois inducteur et induit : *self-induction* ou *induction propre*.

Induction par les courants. — Soit une source électrique S mise dans un circuit comprenant une portion rectiligne CD ; elle engendre un champ magnétique. Mettons dans ce champ un circuit fermé ABG avec un galvanomètre G et une partie AB parallèle à CD. Nous allons faire varier le flux émané de CSD et traversant l'induit, par les deux moyens énoncés :



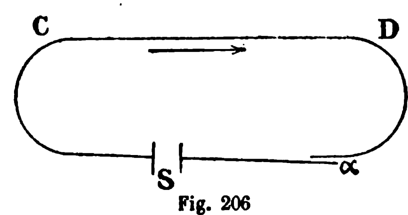


Fig. 206

I. *Déplacements relatifs.* — Éloignons l'une de l'autre les deux portions parallèles ; immédiatement l'aiguille du galvanomètre est lancée en dehors de sa position ordinaire et accuse un courant induit de même sens que l'inducteur; nous l'appellerons *direct*. Ce passage ne dure pas; il correspond au temps employé au changement de position, car l'aiguille mobile revient en place dès que les circuits sont immobiles l'un par rapport à l'autre.

Pendant toute la durée du repos, le galvanomètre n'indique rien ; il n'y a donc pas de courant induit alors.

Enfin *rapprochons* les deux parties parallèles : l'aiguille reçoit encore une impulsion due cette fois à un courant *inverse*.

II. *Modification du champ lui-même.* — Le moyen le plus simple consiste à supprimer ou à rétablir rapidement le courant inducteur ; mais on peut obtenir des modifications moins profondes par des changements d'intensité :

1° Le circuit inducteur est muni d'une clef α que l'on fait jouer à un moment donné pour couper le fil ; le *courant cesse;* le champ est donc supprimé et l'on voit le galvanomètre marquer un induit *direct*.

L'aiguille revient au zéro si l'interrupteur est laissé ouvert.

Enfin la réunion des deux parties du fil donne un induit *inverse*, mais ce courant cesse aussitôt ; il n'a plus lieu si l'inducteur reste établi.

2° Nous allons maintenant introduire dans le circuit une résistance supplémentaire ; cela fera diminuer, d'après la loi d'Ohm, l'intensité du courant et par suite le flux de force ; cette variation est accompagnée d'un induit *direct*. La suppression de la bobine résistante produit dans le second circuit un effet opposé, c'est-à-dire un courant *inverse* par rapport à l'inducteur.

Ainsi nous avons là, en somme, trois manières de produire l'induction; nous les résumerons dans le tableau suivant :

Si le courant inducteur :			Le courant induit est :
s'approche est immobile s'éloigne	commence persiste finit	augmente est constant diminue	inverse nul direct

Pratiquement pour montrer les courants d'induction, on a deux bobines concentriques (fig. 207), l'une A reliée à une source d'électricité, l'autre extérieure B fait partie d'un circuit qui comprend le galvanomètre G. On a ainsi les deux portions parallèles dont il a été question, et des fils pouvant atteindre de grandes longueurs, ce qui accentue les phénomènes.

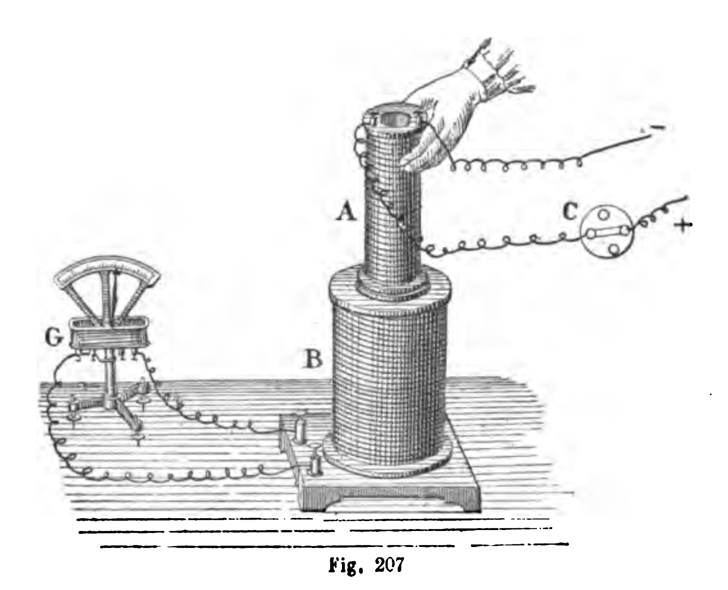


Fig. 207

Pour modifier les distances, il suffit d'enfoncer ou de retirer de la bobine creuse, l'inductrice qui est mobile.

Si l'on veut faire cesser ou commencer instantanément le courant inducteur, on fait jouer l'interrupteur C : en le tournant dans un sens on établit la communication; on intercepte au contraire le courant par la manœuvre inverse.

Il s'agit enfin de modifier l'intensité du courant inducteur ; on prend pour cela une bobine *b* résistante, en ferro-nickel, par exemple, mise en dérivation sur un interrupteur C (fig. 208). D'après cette disposition, le courant passe en entier ou à peu près dans la partie sans résistance quand l'interrupteur ferme le circuit (1). Il suffit de

1. Position supposée dans la figure.

tourner le levier pour obliger le courant à traverser la bobine : l'intensité subit alors une brusque diminution; on provoque, au contraire, une augmentation de courant si l'on remet le commutateur dans sa position initiale.

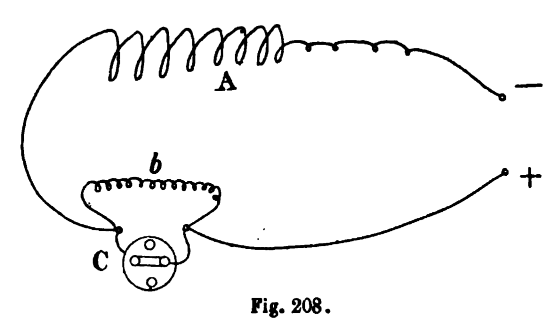


Fig. 208.

Ces différents phénomènes produits par les courants constituent l'*induction électro-dynamique*.

Induction par les aimants. — Le champ créé par un aimant ressemble à celui des courants ; il en résulte la possibilité d'obtenir des effets d'induction au moyen des aimants. Soit l'aimant N présentant son pôle Nord en avant de la figure. On place dans son champ le circuit ABG comprenant le galvanomètre G. D'après la théorie d'Ampère, ce barreau aimanté est assimilable à un solénoïde dont le courant a le sens indiqué par les flèches (fig. 209) (inverse des aiguilles d'une montre) :

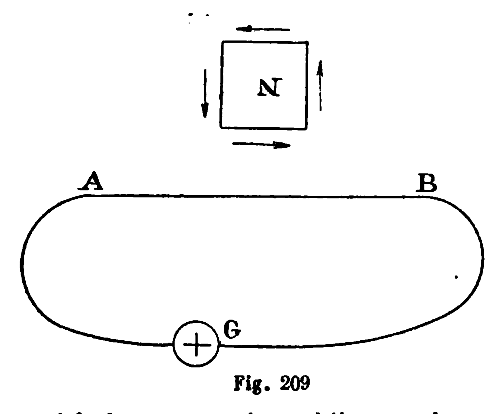


Fig. 209

1° Éloignons l'aimant du circuit; nous obtenons un courant allant de A à B; on peut l'appeler *direct* par rapport aux courants particulaires de l'aimant inducteur, dans la partie voisine;

Si le barreau est immobile, on n'a pas de courant induit.

Enfin, le rapprochement du circuit et de l'aimant engendre un courant qui est inverse;

2° On peut aussi, comme dans l'induction électro-dynamique, faire varier le champ lui-même, établir tout d'un coup le champ magnétique et le supprimer ensuite de la même façon. Pour l'établir, on amène rapidement l'aimant d'assez loin dans le voisinage du circuit : on constate un courant *inverse* de très courte durée. Pendant la présence de l'aimant, le galvanomètre est au repos, mais si, à un moment, on emporte très loin le barreau, on provoque un courant *direct* par rapport aux courants particulaires.

Pratiquement on fait encore usage d'une bobine creuse dans laquelle peut entrer le barreau (fig. 210).

Cette induction *magnéto-électrique* se produit aussi avec les électro-aimants. Reprenons le dispositif qui nous a servi à montrer l'induction par les courants, mais dispo-

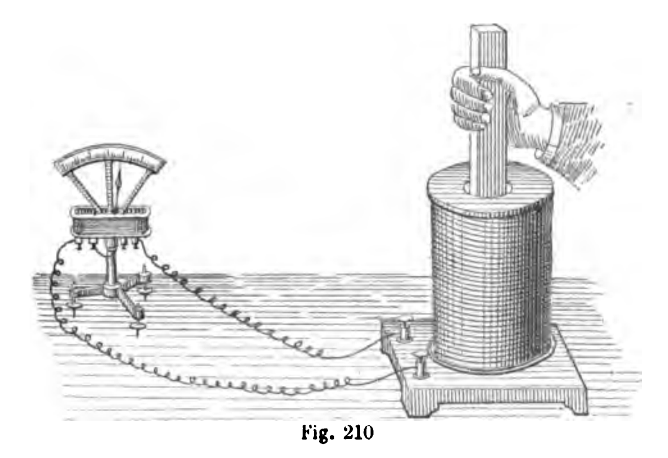


Fig. 210

sons en outre, au milieu de la bobine inductrice, un cylindre de fer doux (fig. 211). Ce noyau augmente beaucoup l'intensité du champ et par suite les courants induits.

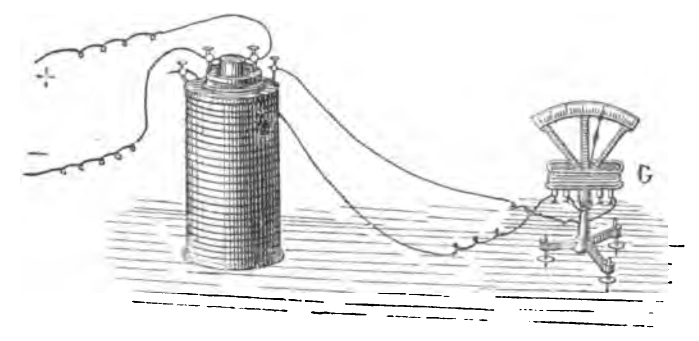


Fig. 211

Induction par la terre. — Le champ terrestre a une direction et une grandeur déterminées en chaque endroit. La seule ressource que l'on ait pour modifier le flux de force passant dans un circuit est donc de déplacer le fil. On a alors des courants d'induction dits *telluriques*. Ils sont faibles en général et, pour les apprécier, on doit se placer dans les meilleures conditions, en modifiant le plus possible le flux de force. On prend une bobine MN de large surface et constituée par un assez grand nombre de spires (fig. 212). On la présente normalement à la direction de la force magnétique terrestre et on retourne ensuite le cadre face pour face, ce qui change le sens du flux reçu dans la bobine : un galvanomètre sensible accuse un courant induit.

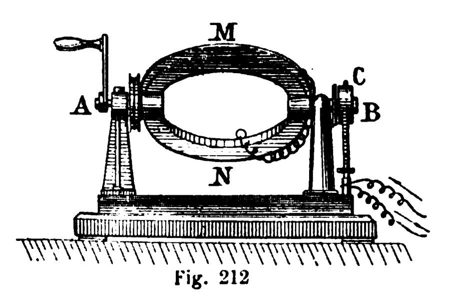


Fig. 212

Induction d'un courant sur lui-même. — Un courant fermé produit un champ magnétique qui occupe une certaine portion de l'espace et les lignes de force passent à travers le circuit lui-même. Cette portion qui traverse le circuit dépend de l'intensité du courant, de sa forme et de l'existence de métaux magnétiques à l'intérieur ou dans le voisinage.

Quand on modifie ce flux d'une façon quelconque, on doit obtenir des courants induits comme si le champ était dû à une cause étrangère.

Il est facile de voir que les phénomènes sont d'autant plus intenses que le champ est plus puissant. Ainsi on a intérêt à former le circuit d'une bobine comprenant un grand nombre de tours et à placer même dans l'axe du solénoïde un noyau de fer.

Les courants induits particuliers qui prennent naissance dans ces conditions s'appellent *extra-courants*. Nous pouvons les produire de deux manières principales :

1° Par l'établissement ou la suppression du courant primitif;

2° Par les variations d'intensité de ce courant.

Nous supposons donc que l'on ait un électro-aimant; nous l'alimentons d'un courant continu et nous plaçons sur le fil un interrupteur.

1° Coupons le circuit à un moment donné; le galvanomètre est lancé au delà de la position qu'il occupait pour revenir immédiatement après au zéro. Ainsi le courant de *rupture* est *direct* par rapport à l'inducteur; il dure le temps de la modification.

Rétablissons ensuite le courant principal par le jeu de l'interrupteur; il se produit un *induit inverse*, mais nous ne pouvons le vérifier directement.

Pendant le passage du courant principal, il n'y a pas d'extra-courant;

2° Si au lieu de supprimer le courant, nous ne faisons que le diminuer, les effets sont les mêmes à l'intensité près; l'induit est direct. L'accroissement du courant donne un induit inverse.

Un cas particulier de variation d'intensité est présenté par les courants alternatifs : pendant le premier quart de la période, le courant d'abord nul va en croissant d'où un *induit inverse;* puis l'intensité décroît jusqu'à une valeur négative maxima : *induit direct*. Ces phénomènes se reproduisent indéfiniment de la même manière, de sorte qu'on obtient des courants induits alternatifs comme l'inducteur.

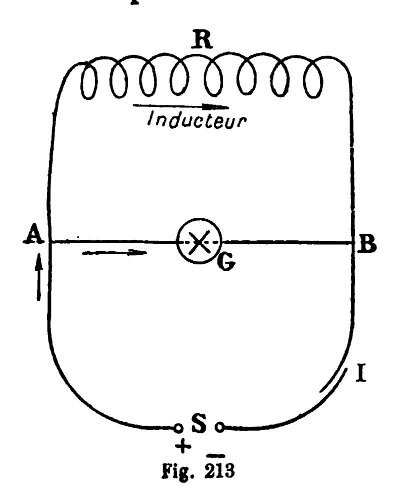


Fig. 213

Pour montrer les phénomènes de self-induction, on a recours à l'expérience suivante :

Dans le circuit d'une source S (fig. 213), on met une bobine R à noyau de fer, formée d'un grand nombre de spires et un interrupteur I. Pour constater les extra-courants, on emploie une dérivation AB avec un galvanomètre G. Supposons le courant établi; la fraction de courant qui passe dans G produit une déviation *oa* de l'aiguille (fig. 214). On note *oa*, puis on interrompt le

courant ; après quelque temps, l'aiguille revient au zéro. Alors avec un petit butoir *c*, amenons l'aiguille en *a* et maintenons-la dans cette position en l'absence du courant. Si nous *fermons le circuit*, l'aiguille est lancée au delà de *a*. C'est l'effet de l'*extra-courant de fermeture* ; il est, dans le galvanomètre, de même sens que le courant principal, c'est-à-dire de A en B; il marche donc suivant ABR, c'est-à-dire qu'il est, dans la bobine, *inverse du courant inducteur* (fig. 213).

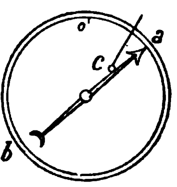
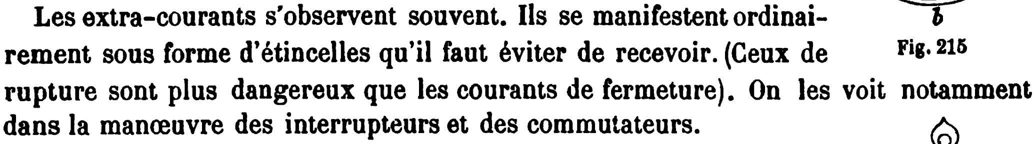


Fig. 214

On montre l'extra-courant de rupture en mettant le butoir en *c* (fig. 215) pour empêcher la déviation de l'aiguille sous l'action du courant principal. Cela préparé, on établit le courant : l'aiguille reste immobile; mais elle est fortement lancée, l'extrémité *a* à gauche, dès que le *courant* est *rompu*. A ce moment l'induit observé marche, dans le galvanomètre, contrairement au courant primitif, soit de B vers A; il a donc, dans toute la partie fermée, le sens BAR : il est par conséquent *direct dans la bobine* R (fig. 213).

Fig. 215



Les extra-courants s'observent souvent. Ils se manifestent ordinairement sous forme d'étincelles qu'il faut éviter de recevoir. (Ceux de rupture sont plus dangereux que les courants de fermeture). On les voit notamment dans la manœuvre des interrupteurs et des commutateurs.

Il est possible de mettre les extra-courants en évidence par le moyen des lampes à incandescence. Les formes données aux expériences sont nombreuses. Soit seulement l'une d'elles : mettons en dérivation une lampe et un électro-aimant; nous réunissons le circuit à une source capable de donner à la lampe ainsi placée une faible incandescence (fig. 216). Par suite des extra-courants qui se développent dans le circuit fermé de l'électro et de la lampe, nous voyons le filament devenir très lumineux aux moments où le courant est interrompu ou rétabli. Cet éclat ne dure pas ; il est bien dû aux courants d'induction.

Fig. 216

CHAPITRE II

LOIS DE L'INDUCTION

Loi de Lenz. — Comme conclusion du chapitre précédent, nous pouvons dire que l'induction se produit dans un conducteur linéaire si nous modifions le flux de force reçu par le circuit.

On a cherché les *effets* de ce courant induit et on les a comparés aux *causes* du phénomène.

Lenz a résumé cette étude dans l'énoncé très simple que voici (1832) :

Le courant induit tend toujours à s'opposer à la cause qui l'engendre.

Montrons-le par quelques exemples :

1° Reprenons la première expérience indiquée : éloignons l'un de l'autre deux fils dont l'un est parcouru par un courant électrique; nous provoquons un induit direct. L'*effet* est une attraction des deux courants parallèles et de même sens. Cette action s'oppose à l'écart communiqué aux conducteurs pour produire le phénomène c'est-à-dire à la *cause*.

2° Faisons naître l'inducteur; cela crée un champ magnétique et, au même instant, un courant inverse prend naissance par induction : il produit un champ contraire du précédent ; *l'effet s'oppose donc bien à la cause*.

3° Soit enfin un circuit fermé, siège d'un courant. Nous coupons le fil pour supprimer la circulation d'électricité et aussitôt un courant d'induction remplace, pour un instant, celui que nous avons détruit.

Cette loi de Lenz donne donc, dans tous les cas, le *sens* du courant induit.

Pour démontrer expérimentalement la loi de Lenz, nous ferons l'expérience suivante :

Prenons un galvanomètre Deprez-d'Arsonval (voir plus loin *Mesures électriques*). Il comprend un cadre à fil fin mobile dans le champ magnétique d'un aimant puissant. En temps ordinaire les extrémités de la bobine aboutissent à deux bornes extérieures à l'appareil et le circuit reste *ouvert*; nous pouvons alors déplacer le cadre; il oscille avec la plus grande facilité autour de sa position d'équilibre.

Mais changeons ensuite les circonstances de l'expérience : réunissons, par un conducteur, les deux bornes du galvanomètre : le mouvement s'arrête brusquement.

Interprétons ce fait : Le circuit, que nous venons de *fermer sur lui-même*, se déplace dans un champ magnétique. Cela suffit pour créer un *courant induit* et l'*arrêt* immédiat du cadre est l'*effet* de cette induction.

Règle de Maxwell. — L'emploi de la loi précédente est quelquefois peu commode pour la détermination rapide du sens de l'induction. Plusieurs règles ont été proposées. Celle de Maxwell est une des plus simples et il est bon d'y avoir recours quand il s'agit de circuits fermés : spires uniques ou bobines.

Soit en particulier une spire C dans un champ magnétique dont les lignes de force ont le sens marqué par les flèches ff' (fig. 217).

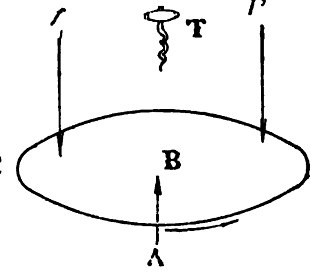


Fig. 217

Nous changeons, par un mouvement ou par tout autre moyen, le flux traversant le circuit; cela suffit pour produire de l'induction et le courant obtenu doit *s'opposer à la modification,* d'après la loi de Lenz; nous cherchons le sens de ce courant.

De deux choses l'une : ou le *flux augmente* ou bien il *diminue* à travers l'anneau.

1° S'il *augmente*, l'effet de l'induction est de créer un flux *contraire* à celui que nous venons de renforcer (loi de Lenz); le flux nouveau a donc le sens AB. Or nous avons vu (page 168) une règle de Maxwell reliant le sens d'un courant à celui du champ résultant. Nous devons disposer un tire-bouchon et le faire tourner dans le sens de l'électricité pour lui imprimer un déplacement longitudinal suivant les lignes de force. Réciproquement, connaissant ces dernières nous enfoncerons le tire-bouchon dans le sens de ces lignes et la rotation nécessaire à ce mouvement définira le sens du courant. Nous avons donc, dans le cas qui nous occupe, à enfoncer l'instrument de A vers B, la rotation est indiquée (fig. 217) elle fixe le sens de l'induit.

2° Si le flux *diminue* l'induction tend à l'*augmenter* (loi de Lenz). Cette variation correspond à un champ ff' concordant avec le champ initial. On doit donc tourner la vis de manière à la faire avancer dans le sens primitif des lignes de force.

En résumé voici la règle :

Si le flux qui traverse le circuit augmente, faire marcher le tire-bouchon en sens contraire des lignes de force;

Si le flux diminue, donner au tire-bouchon le sens même des lignes de force.

Le sens de la rotation fixe le sens du courant induit.

Force électromotrice d'induction. — Nous savons déterminer rapidement le *sens* du courant induit; il nous reste maintenant à calculer sa *grandeur*.

Pour y arriver, nous allons supposer un circuit où passe un courant continu de force électromotrice E. Quand ce conducteur est dans des conditions invariables, l'électricité s'y écoule avec une intensité I donnée par la loi d'Ohm :

$$I = \frac{E}{R}$$

où R est la résistance du conducteur.

Nous pouvons écrire identiquement :

$$E = IR$$

ou encore, en multipliant les deux membres par la quantité I, différente de zéro :

$$EI = RI^2$$

EI représente la puissance de la source; RI^2 est l'énergie dissipée en chaleur dans le conducteur par seconde. Donc, dans les conditions actuelles, toute l'énergie de l'électricité sert à échauffer le fil. Cela a lieu constamment et en particulier aussi pendant un intervalle de temps très petit dt. Alors :

$$EI\,dt = RI^2\,dt$$

Mais provoquons dans ce conducteur un phénomène d'induction par un des moyens connus. Par exemple, déplaçons le circuit dans un champ magnétique; les forces électro-magnétiques exécutent un certain travail que nous pouvons calculer : c'est le produit de la variation du flux par l'intensité du courant (voir page 163) sans nous occuper du signe de ce travail. Mais le courant ne conserve pas son intensité primitive; s'il travaille réellement, il s'affaiblit; si au contraire, on lui fournit du travail pour la modification, son intensité augmente.

Appelons I' la nouvelle intensité; alors l'énergie totale produite par le courant pendant le temps dt est

$$EI'\,dt$$

La chaleur dégagée dans le fil correspond, pendant la même période, à .

$$RI'^2 dt$$

Enfin, si la variation de flux est $d\mathfrak{N}$, le travail en jeu dans la modification est

$$\pm\, I'd\mathfrak{N}$$

Ce travail et la chaleur dégagée ont été puisés à la même source, énergie du courant EI' dt; écrivons-le

$$EI'dt = RI'^2 dt \pm I'd\mathfrak{N}$$

ou, en divisant de part et d'autre par la quantité I' différente de zéro

$$E\,dt = RI'dt \pm d\mathfrak{N}$$

On tire de là

$$RI'dt = E\,dt \mp d\mathfrak{N}$$

d'où

$$I' = \frac{1}{R}\left(E \mp \frac{d\mathfrak{N}}{dt}\right)$$

Ainsi ce courant d'intensité I' semble provenir d'une source à potentiel $E \mp \frac{d\mathfrak{N}}{dt}$ mise dans le circuit de résistance R. Or la force électromotrice existante est E; on doit en conclure que l'induction fait naître une différence de potentiel e égale en valeur absolue à

$$e = \frac{d\mathfrak{N}}{dt}$$

L'induction ne dépend pas du tout de l'état primitif du courant; elle n'est liée qu'à la variation produite. La force électromotrice est exactement la même, qu'il y ait d'abord un courant ou qu'il n'y en ait pas. Nous pouvons dire :

La force électromotrice d'induction égale le quotient de la variation du flux par le temps nécessaire à la modification,

ou encore:

La force électromotrice d'induction est égale à la variation du flux par unité de temps.

En nous reportant à la page 163, nous voyons que la variation de flux peut, dans le cas du déplacement d'un conducteur, être assimilée au flux coupé par les divers éléments ; d'où un autre énoncé :

La force électromotrice d'induction égale le flux coupé pendant l'unité de temps par les divers éléments du conducteur.

Quant au sens de cette différence de potentiel, nous savons le déterminer directement; nous ne discuterons pas ici la question des signes.

Intensité du courant induit. — Nous venons de trouver la force électromotrice d'induction. Si R est la résistance du conducteur, nous avons un *courant induit* d'une certaine *intensité* moyenne i, donnée par la loi d'Ohm

$$i = \frac{e}{R} = \frac{1}{R}\frac{d\mathfrak{N}}{dt}$$

Quantité d'électricité induite. — Soit un intervalle de temps dt; la quantité transportée pendant ce temps est

$$dm = i\,dt = \frac{1}{R}\,d\mathfrak{N}$$

et si la variation de flux dure un temps T, il faut, pour trouver la charge totale, calculer l'expression

$$m = \int_0^T i\,dt = \frac{1}{R}\int_0^T d\mathfrak{N}$$

L'intégration est immédiate :

$$m = \frac{\mathfrak{N}_T - \mathfrak{N}_0}{R}$$



$\mathfrak{N}_T$ étant le flux qui traverse le circuit à la fin de la modification, au temps T, et $\mathfrak{N}_0$ la valeur initiale de ce flux.

Nous pouvons donc dire :

La quantité d'électricité induite est le quotient de la variation du flux par la résistance du circuit.

ou encore, s'il s'agit spécialement d'un déplacement :

La charge induite égale le flux coupé pendant le déplacement divisé par la résistance du fil.

Cette quantité d'électricité est finie et souvent même peu considérable; mais elle se déplace pendant un temps très court; c'est pourquoi elle peut donner lieu à des effets très énergiques.

Règle de Faraday. — Les lois de Lenz et de Maxwell ne sont pas toujours faciles à appliquer. Nous allons compléter l'étude du sens du phénomène par une troisième règle tirée de la loi générale.

Considérons par exemple une portion de conducteur AB (fig. 218) se déplaçant de manière à faire varier le flux de force embrassé par le circuit total; nous voulons trouver le sens de la force électromotrice d'induction.

Soit ABC le circuit dans son premier état; il est traversé par une portion de flux en relation avec l'étendue de la surface limitée par ABC.

Nous déplaçons ensuite le conducteur AB jusqu'en A'B'; le flux passe alors en quantité plus considérable. Pour avoir le sens du phénomène d'induction, nous supposerons, circulant dans le fil, un courant arbitraire, de sens ABC par exemple (fig. 218). L'observateur d'Ampère, personnifiant ce courant et regardant dans la direction des lignes du champ, c'est-à-dire en avant, se déplace vers sa droite. Alors le flux coupé se compte négativement (voir page 163) et le travail *produit* par le courant a le même signe, ce qui veut dire qu'il est *absorbé*. Or un courant qui *absorbe de l'énergie augmente d'intensité;* cette augmentation forme un courant induit qui est par conséquent *direct*, c'est-à-dire dans le sens supposé, soit AB dans le fil.

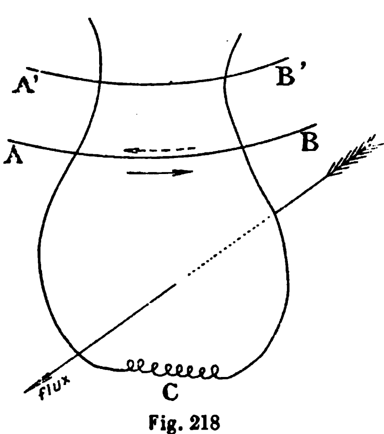


Fig. 218

Cette conclusion ne dépend nullement du point de départ du raisonnement. En effet, nous allons trouver le même résultat en partant d'une hypothèse opposée à la première. Admettons donc le sens BA (flèche pointillée); l'observateur d'Ampère est entraîné à gauche par le déplacement. Le courant *travaille* donc effectivement; il s'*affaiblit* et la diminution d'intensité est mise sur le compte du courant induit (qui est alors *inverse* de BA); il marche donc bien suivant AB.

Nous remarquons que l'observateur personnifiant l'induit se transporte à sa droite, ce qui nous permet d'énoncer la règle de Faraday :

Le courant induit est personnifié par un observateur regardant dans la direction du champ et se déplaçant vers sa droite.

Cette loi est très facile à appliquer quand une portion de conducteur se meut dans le champ magnétique.

Application des lois de l'induction. — Nous allons considérer plusieurs cas. Nous aurons soin toujours de prendre des bobines auxquelles on puisse appliquer les lois de l'électro-magnétisme, pour le calcul du flux, c'est-à-dire des bobines longues ou des anneaux fermés :

1° Soit une bobine de 1 mètre de longueur ; elle est garnie de 300 tours d'un fil parcouru par un courant de 10 ampères. Sa section est de 10 centimètres carrés. On l'entoure d'une autre bobine comprenant 2.000 spires et tout à coup on supprime le courant intérieur. On demande la force électromotrice d'induction si la suppression de l'inducteur demande 1/100 de seconde.

Évaluons d'abord le flux créé dans la bobine inductrice. Nous avons

$$\mathcal{H} = \mathcal{B} = 1{,}25 \times \frac{300 \times 10}{100} = 37{,}5 \text{ gauss.}$$

Pour la section entière, le flux est

$$\mathfrak{N} = 10\,\mathcal{B} = 375$$

Telle est la valeur de la *variation* du flux quand on supprime le courant. Si cette opération dure 1/100 de seconde, on a pour force électromotrice *dans chaque spire* induite

$$e = \frac{375}{\frac{1}{100}} = 37.500 \qquad \text{CGS}$$

et dans les 2.000 spires

$$\text{E} = 2.000\,e = 75.000.000 \qquad \text{CGS}$$

Or

$$1 \text{ volt} = 10^8 \qquad \text{CGS}$$

Donc nous avons

$$\text{E} = 0{,}75 \text{ volt.}$$

Quant au sens de ce courant, nous le connaissons : c'est celui du courant inducteur.

Si la résistance du fil induit nous est connue, 3 ohms par exemple, le courant présente une intensité moyenne

$$\text{I} = \frac{0{,}75}{3} = 0{,}25 \text{ ampère}$$

et la quantité d'électricité mise en mouvement par l'induction est

$$Q = 0,25 \times \frac{1}{100} = 0,0025 \text{ coulomb};$$

2° Remplissons maintenant d'une masse de fer l'intérieur de la bobine inductrice précédente et répétons l'opération indiquée.

Calcul du flux : nous avons pour le nombre d'ampères-tours par centimètre

$$\frac{300 \times 10}{100} = 30.$$

Le tableau de la page 174 nous indique, si nous faisons l'interpolation

$$\mathcal{B} = 15475$$

Alors

$$\mathcal{N} = 10\ \mathcal{B} = 154.750.$$

Chaque spire est le siège d'une force électromotrice

$$e = \frac{154.750}{\frac{1}{100}} = 15.475.000 \qquad \text{CGS}$$

et on a, dans les 2.000 spires

$$E = 2.000 \times 15.475.000 = 30.950.000.000 \qquad \text{CGS}$$
$$= 309,5 \text{ volts.}$$

Intensité moyenne :

$$I = \frac{309,5}{3} = 103,16 \text{ ampères}$$

Quantité d'électricité déplacée :

$$Q = \frac{103,16}{100} = 1,03 \text{ coulomb.}$$

3° Soit un tore de fer doux de section de 10 centimètres carrés et de longueur (comptée suivant l'axe) de 50 centimètres.

On l'alimente d'un courant de 10 ampères et cet établissement de l'électricité demande 1/100 de seconde; on sait, de plus, qu'il y a 250 spires de fil.

Nombre d'ampères-tours par centimètre

$$\frac{250 \times 10}{50} = 50$$

On trouve (tableau page 174)

$$\mathcal{B} = 16.315$$
$$\mathcal{N} = \mathcal{B}s = 16.315 \times 10 = 163.150$$

Force électromotrice dans une spire

$$e = \frac{163.150}{\frac{1}{100}} = 16.315.000 \qquad \text{CGS}$$

Dans les 250 spires, on a

$$E = 250\,e = 16.315.000 \times 250$$
$$= 4.078.750.000 \quad \text{CGS}$$
$$= 40,79 \text{ volts.}$$

Avec une résistance d'un ohm, nous avons pour intensité

$$I = \frac{E}{R} = 40,79 \text{ ampères}$$

Quantité d'électricité déplacée :

$$Q = It = 40,79 \times \frac{1}{100} = 0,408 \text{ coulomb.}$$

4° Soit l'appareil qui sert à démontrer l'induction par la terre; la surface du cercle est de 1 mètre carré et l'on a 50 spires.

Le plan du cadre étant perpendiculaire à la direction de la force terrestre, on fait exécuter un demi-tour à l'appareil et ce mouvement exige 1/10 de seconde. On demande d'étudier l'induction.

Soit F l'intensité du champ terrestre; le flux qui entre dans le cadre est

$$\mathfrak{N} = F \times s$$

Or :

$$F = 0,465$$
$$s = 10.000$$

donc :

$$\mathfrak{N} = 0,465 \times 10.000 = 4.650$$

Le retournement du cadre renverse complètement le flux, de sorte que la variation produite est le double de $\mathfrak{N}$, soit :

$$2 \times 4.650 = 9.300$$

Dans une spire, la force électromotrice a la valeur :

$$e = \frac{9.300}{\frac{1}{10}} = 93.000 \quad \text{CGS}$$

et dans les 50 spires réunies :

$$E = 50\,e = 93.000 \times 50 = 4.650.000 \quad \text{CGS}$$
$$= 0,0465 \text{ volt.}$$

Dans tous les exemples que l'on *peut* traiter, il est bon de chercher d'abord le *sens* du courant, et cela au moyen des règles indiquées : Lenz, Maxwell, Faraday, suivant le cas. Ensuite on procède au *calcul* de la force électromotrice par la formule obtenue page 203.



CHAPITRE III

COEFFICIENTS D'INDUCTION

Coefficient d'induction mutuelle de deux circuits. — Quand deux circuits sont en présence, les lignes de force émanant du premier passent en proportion plus ou moins grande à travers le second et réciproquement.

Soient, par exemple, C et C', les deux fils conducteurs parcourus par des courants d'intensité I et I'. Appelons $\mathfrak{N}$ le flux émis par C et traversant C'; si nous modifions ce flux nous produisons un certain travail, dont le maximum est obtenu quand nous annulons ce flux $\mathfrak{N}$ reçu par C'. Ce travail maximum a pour valeur (voir page 164).

$$\mathfrak{T} = \mathfrak{N} \times I'$$

car le flux passe de la valeur $\mathfrak{N}$ à zéro, dans la modification. Ce flux $\mathfrak{N}$ a pour origine un courant C d'intensité I. Si l'intensité électrique était réduite à l'unité, le flux prendrait une valeur L telle que :

$$L = \frac{\mathfrak{N}}{I}$$

Nous en tirons :

$$\mathfrak{N} = LI$$

et

$$\mathfrak{T} = LII'$$

Nous pouvons de même évaluer le flux $\mathfrak{N}'$ émané de C' et traversant C. Rapporté à l'unité d'intensité de C', ce flux devient L' et l'on a

$$L' = \frac{\mathfrak{N}'}{I'}$$

d'où

$$\mathfrak{N}' = L'I'$$

et si alors on fait varier ce flux de $\mathfrak{N}'$ à zéro, le travail effectué se mesure par le produit de l'intensité I par la variation de flux $\mathfrak{N}'$. On a donc

$$\mathfrak{T}' = \mathfrak{N}' I = L'I'I$$

Ces variations des flux de $\mathfrak{N}$ à 0 et de $\mathfrak{N}'$ à 0 peuvent en particulier être obtenues

en déplaçant respectivement ou C' infiniment loin par rapport à C, ou C infiniment loin par rapport à C'.

Ces deux déplacements conduisent à un même résultat et l'on obtient, dans les deux cas, une égale somme de travail. Nous écrivons donc

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}'$$

$$\mathrm{L\,I I'} = \mathrm{L' I' I}$$

d'où l'on tire

$$\mathrm{L} = \mathrm{L'}$$

ou encore

$$\frac{\mathfrak{M}}{\mathrm{I}} = \frac{\mathfrak{M}'}{\mathrm{I'}}$$

Ainsi :

Il existe un rapport constant entre le flux reçu par l'un des circuits et l'intensité de l'autre courant.

Cette constante s'appelle *coefficient d'induction mutuelle* des deux circuits. Nous pouvons la définir comme *le flux de force qui traverse l'un des circuits quand l'autre est parcouru par un courant d'intensité unité. On la représente par* L_m.

Elle nous permet d'écrire les valeurs des flux $\mathfrak{M}$ et $\mathfrak{M}'$ qui traversent les deux circuits

$$\mathfrak{M} = \mathrm{L}_m \mathrm{I}$$

$$\mathfrak{M}' = \mathrm{L}_m \mathrm{I'}$$

La quantité L_m joue un grand rôle dans les phénomènes d'induction. Considérons le circuit C' recevant le flux $\mathfrak{M}$. Nous savons que la force électromotrice, due à une variation du flux égale à $d\mathfrak{M}$ pendant un temps dt, a pour valeur

$$e = \frac{d\mathfrak{M}}{dt}$$

Remplaçons $\mathfrak{M}$ par sa valeur L_m I, nous aurons

$$e = \frac{d(\mathrm{L}_m \mathrm{I})}{dt}$$

Or la modification apportée peut être de diverses natures :

1° Si les circuits C et C' sont immobiles l'un par rapport à l'autre, le changement de flux ne peut provenir que de la variation d'intensité du courant inducteur, car L_m est invariable. On a alors

$$e = \mathrm{L}_m \frac{d\mathrm{I}}{dt}$$

2° L'intensité peut être constante, mais il est possible de déplacer l'un des courants relativement à l'autre. On a dans ce cas, où L_m varie

$$e = \mathrm{I} \frac{d\mathrm{L}_m}{dt}$$

3° Le déplacement peut être compliqué d'un changement d'intensité, et il vient

$$e = \mathrm{I}\frac{d\mathrm{L}_m}{dt} + \mathrm{L}_m\frac{d\mathrm{I}}{dt}$$

Nous avons considéré une seule spire recevant le flux. Si le circuit induit est constitué par une série de spires, s'il forme, par exemple, une bobine, on peut répéter, pour chacune des parties, le raisonnement précédent, et alors le coefficient L_m prend une nouvelle valeur, produit de la première par le nombre de tours du fil.

Cette constante dépend d'ailleurs de l'existence de masses magnétiques dans la bobine ou à proximité.

Coefficient de self-induction d'un circuit. — Soit une spire isolée parcourue par un courant ; elle est traversée par les lignes de force qu'elle engendre elle-même. Ce flux dépend de la forme du fil et de l'intensité de son courant. Il varie aussi évidemment avec la nature des milieux magnétiques qui peuvent environner le conducteur.

Pour une intensité unité, le flux prend une valeur déterminée L_s ; on l'appelle alors *coefficient d'induction propre* ou de *self-induction* du circuit.

Cette constante joue dans les phénomènes d'extra-courant le même rôle que le coefficient L_m dans l'induction mutuelle. Elle nous permet de calculer le courant induit dans les divers cas possibles.

S'il s'agit d'une *bobine*, le coefficient L_s prend une valeur liée à sa forme, à sa longueur, à sa section, au nombre des spires et à la perméabilité des corps formant le noyau ou entourant le solénoïde.

Soit en particulier une bobine vide de n tours de fil pour une longueur l. Si l'intensité dans le conducteur est de I ampères, nous avons un nombre d'ampères-tours par centimètre

$$\frac{n\mathrm{I}}{l}$$

Le flux qui parcourt le solénoïde est, comme on l'a déjà dit, par unité de section

$$1{,}25 \times \frac{n\mathrm{I}}{l}$$

Dans cette formule I est exprimé en ampères ; si nous voulons l'évaluer au moyen de l'unité absolue CGS, qui est dix fois plus grande que l'ampère, nous devons prendre un nombre i dix fois plus petit que I et il faut multiplier le produit par 10 si nous voulons obtenir le même résultat.

Donc

$$\mathfrak{N} = 12{,}5\,\frac{ni}{l} \times s$$

Chacune des n spires est traversée par ce flux.

On a donc, pour toute la bobine, une somme de flux

$$12,5 \times \frac{ni}{l} \times s \times n$$

Rapporté à l'unité absolue d'intensité, ce flux donne le coefficient de self-induction. On a donc

$$L_s = 12,5 \times \frac{n^2 s}{l}$$

Pour avoir une idée de la valeur de L_s, prenons un exemple numérique :

Soit une bobine de 25 centimètres garnie de 1.000 tours de fil, section 10 centimètres carrés ; nous avons

$$L_s = 12,5 \times \frac{1.000^2 \times 10}{25} = 5.000.000 \quad \text{CGS}$$

Dans la pratique on adopte, pour la mesure des deux coefficients, une unité spéciale, le *henry*, qui vaut 10^9 unités CGS (Voir plus loin *Unités électriques*).

Dans le cas qui nous occupe

$$L_s = 5 \times 10^6 \quad \text{CGS} \quad = 0,005 \text{ henry}$$

Un noyau magnétique introduit dans la bobine augmente beaucoup le coefficient de self-induction.

On se sert de ce coefficient de la même manière que de L_m. Supposons que le courant principal soit égal à i unités absolues CGS ; le flux total qui traverse toutes les spires du fil est

$$\mathfrak{N} = L_s i$$

On peut modifier ce flux de différentes façons :

1° En changeant l'intensité i. On a alors pour force électromotrice d'induction

$$e = L_s \frac{di}{dt}$$

2° En faisant varier le coefficient de self, sans modifier l'intensité. Alors

$$e = i \frac{dL_s}{dt}$$

On y arrive de bien des manières : par déformation du circuit, par disposition de métaux magnétiques à l'intérieur ou à proximité de la bobine, etc.

3° Les deux variations précédentes peuvent se produire simultanément et, dans ce cas, la force électromotrice d'induction devient

$$e = L_s \frac{di}{dt} + i \frac{dL_s}{dt}$$

Nous avons supposé, dans ces formules, l'intensité donnée en unités absolues CGS. Il arrive souvent que cette quantité soit exprimée en ampères : or on a dit qu'un ampère vaut le dixième d'une unité absolue ; le nombre d'ampères est donc 10 fois plus grand que le nombre d'unités CGS et par suite nous devons conclure que la valeur $\mathfrak{N}$ du flux est

$$\mathfrak{N} = \frac{1}{10} L_s I$$

I étant l'intensité en ampères. Toutes les formules varient comme l'expression du flux.

Le coefficient L_s intervient dans un grand nombre de phénomènes électriques et le plus souvent il résulte de la self-induction des effets nuisibles. On peut quelquefois combattre et même détruire ces effets : soit le cas d'une bobine résistante introduite dans un circuit ; on provoque un courant direct d'autant plus intense que le coefficient est plus considérable. Cette constante est réduite si l'on prend un fil plié en deux et enroulé ensuite en hélice. Considérons deux portions voisines du fil ; elles sont le siège de forces électromotrices égales, mais d'après leur disposition, on voit les deux courants induits se détruire mutuellement.

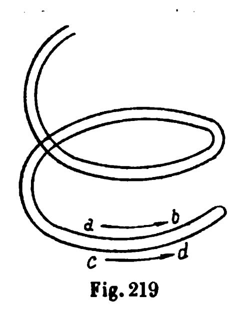


Fig. 219

Remarque : Le coefficient L_s n'est pas toujours le même pour un circuit donné *placé à proximité de corps magnétiques* ; dans ce cas L_s dépend de l'intensité du courant. Ce n'est que par approximation qu'on peut alors supposer constant le coefficient de self-induction.

CHAPITRE IV

CAS PARTICULIERS D'INDUCTION

Nous allons examiner quelques cas très simples surtout dans le but de nous familiariser avec les modes de production de l'électricité par induction.

Problème du rail. — Soient deux conducteurs parallèles AB et CD réunis par un fil f immobile d'une part et par un pont EG glissant sur les deux barres, d'autre part.

Le système est placé dans un champ magnétique uniforme, normalement aux lignes de force, et l'on déplace EG avec une vitesse constante v. La marche du flux étant donnée par les flèches F, voyons :

1° Quel est le *sens* du courant induit, en appliquant la règle de Faraday. L'observateur d'Ampère placé dans le pont EG est face en arrière pour regarder dans la direction des lignes de force. Le déplacement de EG doit l'entraîner vers sa *droite*, ce qui nous fait placer ses pieds en G, sa tête en E : le courant induit se dirige donc suivant GE ;

2° Valeur de la force électromotrice : pendant l'unité de temps, le pont se déplace d'une longueur v ; l'aire de la surface balayée est $v \times l$ si on désigne par l la distance EG ; le flux coupé pendant une seconde est donc

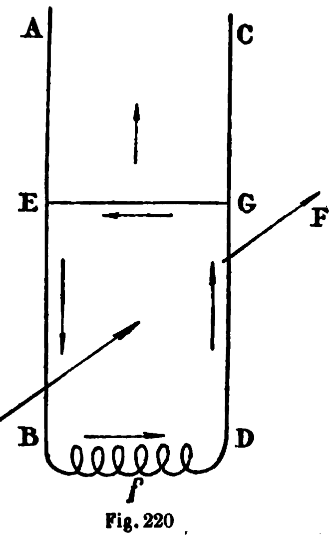


Fig. 220

$$v \times l \times F$$

F étant l'intensité du champ magnétique uniforme. Ce produit est égal à la force électromotrice d'induction (voir page 165). Nous pouvons donc poser

$$e = v \times l \times F$$

Ce cas particulier s'appelle *problème du rail* car il est réalisé par un essieu de wagon se déplaçant par l'intermédiaire des roues sur deux rails de chemin de fer dans le champ magnétique terrestre, ces deux rails étant d'autre part réunis entre eux à l'une de leurs extrémités.

Soient par exemple dans ce cas :

l = 1m,60 ou 160 centimètres
v = 25 mètres ou 2.500 centimètres par seconde
F = 0,42 composante verticale de la force magnétique terrestre.

On a :

$$e = 2.500 \times 160 \times 0,42 = 1,68 \times 10^5 \text{ unités absolues}$$

ou, étant donné que le volt vaut 10^8 unités absolues

$$e = 0,00168 \text{ volt.}$$

La résistance du circuit fBEGD est variable puisque la longueur BE augmente de plus en plus. Si nous lui supposons, à un moment donné, une valeur de $\frac{1}{10}$ ohm, nous obtenons pour intensité du courant induit, à cette époque

$$i = \frac{e}{R} = \frac{0,00168}{0,1} = 0,0168 \text{ ampère}$$

Disque de Faraday. — Soit, dans un champ magnétique supposé uniforme et d'intensité F, un disque métallique de rayon r pouvant tourner avec un axe conducteur xy sur lequel appuie un ressort B. Un autre frotteur A est posé sur le pourtour du disque lui-même et ces deux balais sont réunis entre eux de manière à former un circuit fermé comme l'indique la figure 221.

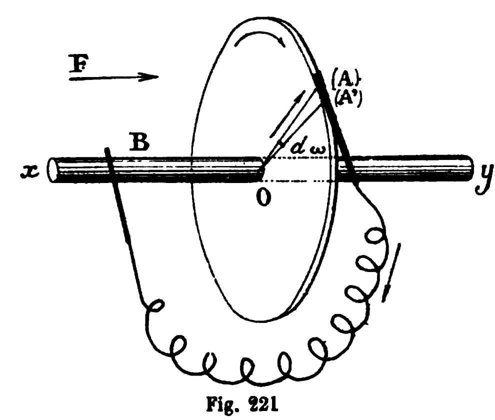


Fig. 221

Nous communiquons le mouvement au plateau ; or le contact en A comprend forcément une certaine portion AA' de la circonférence et non un seul point : sans cesser de faire partie du circuit, le rayon OA tourne jusqu'en OA' en touchant toujours le balai ; il engendre ainsi un secteur d'angle $d\omega$ dont la surface est : $\frac{r^2 d\omega}{2}$. Le flux coupé ainsi est égal au produit de cette aire par l'intensité F du champ.

On a donc

$$d\mathfrak{N} = \frac{Fr^2 d\omega}{2}$$

Cela exige un temps dt ; donc la force électromotrice d'induction est :

$$e = \frac{d\mathfrak{N}}{dt} = \frac{Fr^2}{2} \frac{d\omega}{dt}$$

Or $\frac{d\omega}{dt}$ est l'angle parcouru par unité de temps c'est-à-dire la vitesse angulaire, et

si nous appelons n le nombre des tours effectués en une seconde, cet angle s'exprime par $2\pi n = \frac{d\omega}{dt}$. On a par suite

$$e = \frac{Fr^2}{2} \times 2\pi n = \pi n F r^2$$

Remarquons que πr^2 est la surface S du disque ; donc

$$e = nSF$$

Nous ne nous sommes pas encore occupés du sens du courant ; nous allons pour le déterminer, appliquer la règle de Faraday : mettre dans la partie mobile OA un observateur qui se déplace vers sa droite quand il regarde dans le sens des lignes de force, soit vers y (fig. 221). Cet observateur doit avoir les pieds au centre O, de sorte que le courant est centrifuge dans le cas supposé.

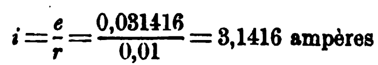
Soit par exemple un champ magnétique d'intensité égale à 1000 unités CGS ; le disque a 10 centimètres de rayon, soit 314,16 centimètres carrés de surface ; on le fait tourner à raison de 10 tours par seconde. La force électromotrice est

$$e = 10 \times 314,16 \times 1.000 = 3,1416 \times 10^6 \quad \text{CGS}$$

ou, puisque 1 volt égale 10^8 CGS

$$e = 0,031416 \text{ volt.}$$

La résistance du circuit fermé peut être faible ; supposons-la de $\frac{1}{100}$ ohm ; il vient pour l'intensité



$$i = \frac{e}{r} = \frac{0,031416}{0,01} = 3,1416 \text{ ampères}$$

Fig. 222

Cadre mobile autour d'un diamètre dans un champ magnétique. — Soit le fil AB de forme circulaire relié, par ses extrémités, aux manchons a et b isolés l'un de l'autre sur l'axe de rotation OO. Deux ressorts r et r' appuient sur ces pièces et sont d'autre part reliés entre eux par un fil qui complète le circuit (fig. 222).

Le cadre est vertical et il se déplace autour du diamètre OO dans un champ supposé uniforme et de direction horizontale. Il résulte de cette disposition une variation continuelle et périodique du flux reçu par le circuit, et par suite des courants d'induction qui se reproduisent à chaque tour, identiques à eux-mêmes.

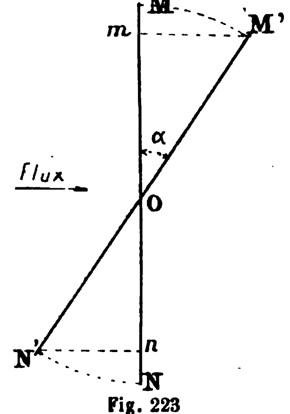


Fig. 223

Soit en MN une projection du cadre sur un plan horizontal (parallèle aux lignes de force, fig. 223).

Comptons le temps à partir du moment où le cercle est en MN ; il tourne vers M'N', position atteinte au temps t ; l'angle parcouru α est donné par

$$\alpha = \omega t$$

si ω est la vitesse angulaire, c'est-à-dire l'angle parcouru par unité de temps.

A cet instant t, le flux reçu par le circuit est celui qui passe dans un tube limité par la circonférence M'N' et dont la section droite est la projection elliptique mn. On peut donc écrire

$$\mathfrak{M} = \mathcal{H} \times (\text{surface } mn)$$

si $\mathcal{H}$ est l'intensité du champ magnétique uniforme.

Continuons le mouvement pendant un temps infiniment court dt à partir de la position M'N'; le flux varie de

$$d\mathfrak{M} = \mathcal{H} \times d\,(\text{surface } mn)$$

Or la surface mn étant la projection de MN ou S a pour valeur

$$\text{Surface } mn = \text{S} \cos \alpha = \text{S} \cos \omega t$$

Alors

$$d\,(\text{surface } mn) = - \text{S}\omega \sin \omega t.\,dt$$

soit en valeur absolue

$$\text{S}\omega \sin \omega t.\,dt$$

On a alors

$$d\mathfrak{M} = \mathcal{H}\,\text{S}\,\omega \sin \omega\,dt$$

et la force électromotrice d'induction s'exprime par

$$e = \frac{d\mathfrak{M}}{dt}$$

ou, en valeur absolue

(1) $$e = \mathcal{H}\text{S}\omega \sin \omega t$$

Dans cette formule, il peut être utile d'exprimer la vitesse angulaire ω en fonction de la durée T d'une révolution. Un tour soit l'angle 2π est exécuté pendant le temps T, et par suite l'angle ω parcouru par unité de temps est

$$\omega = \frac{2\pi}{\text{T}}$$

Alors la formule (1) devient

(2) $$e = \frac{2\pi\mathcal{H}\text{S}}{\text{T}} \sin 2\pi \frac{t}{\text{T}}$$

Le courant induit dans ces conditions est donc essentiellement variable : nul à l'origine choisie pour le temps, e devient maximum pour

$$\sin 2\pi \frac{t}{T} = 1$$

c'est-à-dire pour

$$2\pi \frac{t}{T} = \frac{\pi}{2}$$

Alors $t = \frac{T}{4}$ et le disque a effectué un quart de tour. A ce moment la f. é. m. prend la valeur particulière E

$$E = \frac{2\pi \mathcal{H} s}{T}$$

Le courant s'annule ensuite pour

$$t = \frac{T}{2}$$

puis, pendant le second demi-tour, il passe par les mêmes valeurs absolues que pendant le premier. Le deuxième tour voit exactement les mêmes effets se reproduire, de sorte que e est représenté par une sinusoïde OABCD (fig. 224) dont l'équation (2) peut encore s'écrire

$$e = E \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

Fig. 224

Le courant obtenu est dit *sinusoïdal*; c'est une espèce particulière de *courants alternatifs.*

Nous avons raisonné pour un seul tour de fil ; si la bobine en a N, la force électromotrice est multipliée par ce nombre N.

On appelle *période* l'ensemble des diverses phases par lesquelles passe le courant avant de revenir à son état primitif. Ces phases sont comprises entre les points O et D. La *durée de la période* est le temps T. L'inverse de T c'est-à-dire $\frac{1}{T} = n$ est le nombre de périodes par seconde. Ce nombre mesure ce qu'on appelle la *fréquence* du courant. Remarquons que chaque période comprend deux courants opposés ou *alternances* et disons que, par seconde, il y a $2n$ alternances.

Enfin le produit $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ou $2\pi n$ porte le nom de *pulsation* de la force électromotrice.

Self-induction dans les courants alternatifs. — Reprenons notre cadre mobile précédent et appelons L_s son coefficient de self-induction. En vertu de cette induction propre, les variations continuelles du courant principal produisent des effets dont il faut tenir compte.

Considérons un moment où la force électromotrice du courant principal est e ; l'intensité a la valeur i. Mais le *courant est variable* et il en résulte une force électromotrice d'induction (voir page 211).

$$L_s \frac{di}{dt}$$

Ce courant induit s'oppose au premier de sorte que la f. é. m. résultante est

$$e - L_s \frac{di}{dt}$$

et l'intensité, à l'instant considéré, a pour valeur d'après la loi d'Ohm

$$i = \frac{e - L_s \frac{di}{dt}}{R}$$

Mais on sait que

$$e = E \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

si on désigne par E le maximum de la force électromotrice due au champ. Alors il vient

$$(2) \qquad i = \frac{E \sin 2\pi \frac{t}{T} - L_s \frac{di}{dt}}{R}$$

On peut tirer i de cette équation différentielle. Voici le résultat de l'intégration

$$(3) \qquad i = \frac{E \cos \varphi}{R} . \sin \left(2\pi \frac{t}{T} - \varphi \right)$$

φ étant un angle donné par la relation

$$\text{Tg}\, \varphi = \frac{2\pi L_s}{RT}$$

Nous tirons de (3) plusieurs conséquences :

1° La force électromotrice maxima, qui était E en l'absence de la self-induction devient

$$E \cos \varphi$$

Elle est d'autant plus réduite que $\cos \varphi$ est plus petit ou que l'angle φ est plus grand. Or φ augmente avec L_s et avec la vitesse de rotation ou la fréquence : $\frac{1}{T}$. (Cette diminution se fait d'ailleurs d'autant moins sentir que la résistance R est plus considérable.)



Nous avons dit que la f. é. m. diminue ; c'est un mode d'interprétation. Mais nous pourrions écrire la relation (3) sous la forme

$$i = \frac{\mathrm{E}}{\frac{\mathrm{R}}{\cos \rho}} \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{\mathrm{T}} - \varphi\right)$$

Tout se passe comme si la force électromotrice ne changeait pas, la résistance augmentant de R à $\frac{\mathrm{R}}{\cos \varphi}$. Cette nouvelle valeur de la résistance, relativement aux courants alternatifs, prend différents noms ; on l'appelle *résistance apparente*, *résistance inductive* ou encore *impédance*.

2° Le courant, par suite de la self-induction, retarde sur le champ : le facteur $\sin 2\pi \frac{t}{\mathrm{T}}$ est en effet changé contre $\sin\left(2\pi \frac{t}{\mathrm{T}} - \varphi\right)$.

Cet arc : $2\pi \frac{t}{\mathrm{T}} - \varphi$, qui entre dans la nouvelle formule, peut s'écrire

$$\frac{2\pi}{\mathrm{T}}\left(t - \frac{\varphi \mathrm{T}}{2\pi}\right)$$

Le retard de temps est donc

$$\frac{\mathrm{T}}{2\pi}$$

et si nous le rapportons à la durée T d'une période, il vient la fraction

$$\frac{\frac{\varphi \mathrm{T}}{2\pi}}{\mathrm{T}} = \frac{\varphi}{2\pi}$$

Ce quotient $\frac{\varphi}{2\pi}$ se nomme *retard de phase* ; il est d'autant plus grand que L_s est plus considérable comparativement à R (voir expression de φ). Son maximum a lieu pour $\frac{2\pi \mathrm{L}_s}{\mathrm{RT}} = \infty$. Alors $\varphi = \frac{\pi}{2}$ et le retard de phase est égal à $\frac{1}{4}$.

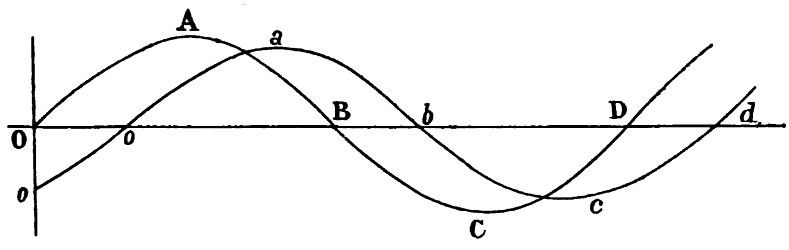


Fig. 225

Les courbes (fig. 225) représentent : OABCD le courant en l'absence de la self-induction ; *oabcd* le même courant modifié ; on voit que les ordonnées de la seconde ligne sont moindres que celles de la première ; de plus la sinusoïde entière est déplacée d'une certaine quantité O*o* $\left(\text{inférieure à } \frac{\mathrm{T}}{4}\right)$ dans le sens des temps positifs.

Il est possible de combattre cet effet de retard produit par la self-induction ; on peut interrompre le circuit et placer un condensateur au point de rupture. Si la capacité de cet appareil est suffisante, la condensation se fait à chaque alternance et la *nature* du courant alternatif n'est pas modifiée par l'interposition du condensateur. Mais l'appareil a un rôle actif : il produit une *avance* du courant, et neutralise par conséquent les effets de l'induction propre. On arrive à supprimer tout retard et en même temps la diminution de force électromotrice.

Réaction de l'inducteur sur l'induit. — Considérons un électro-aimant A dans lequel on envoie des courants alternatifs intenses. Vers la partie supérieure de cette bobine suspendons un anneau léger B. Ce circuit devient le siège de courants alternatifs induits et ces courants ont la même période que les inducteurs ; seulement ils retardent, et ce retard a une double cause :

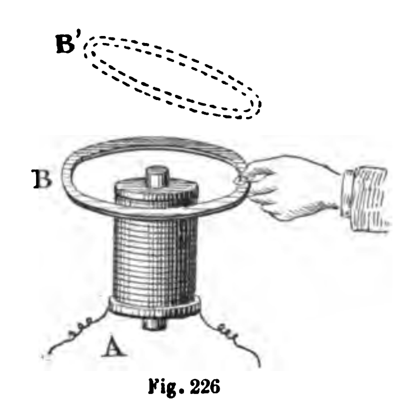


Fig. 226

Si nous ne considérons que l'induction mutuelle, nous obtenons un courant décalé d'un quart de phase en arrière du premier. Cela est évident. Représentons l'inducteur par la sinusoïde OABCD (fig. 227) ; en O la *variation* est positive et maxima : l'induit est maximum et inverse ; en A le premier courant ne varie plus, le second est nul, etc., d'où la courbe A'B'C'D' représentant le courant induit dans l'anneau B, abstraction faite de l'induction propre.

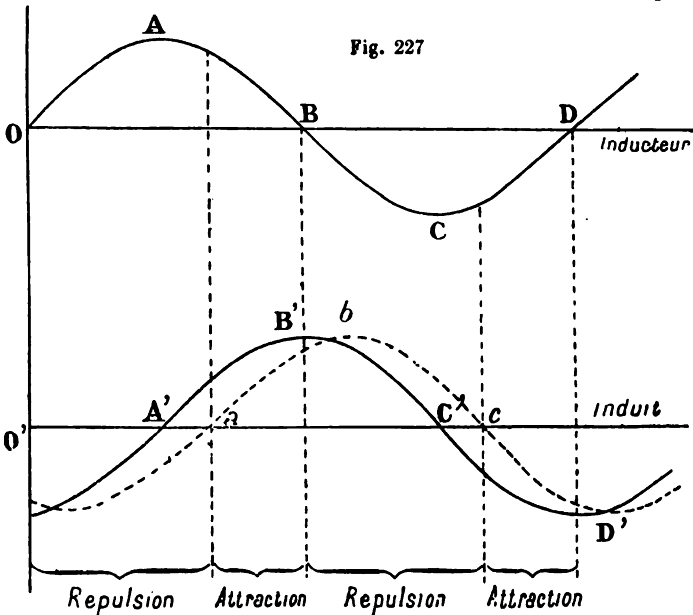


Fig. 227

Mais l'anneau B présente la self-induction, ce qui amène un nouveau retard et nous force à remplacer la courbe A'B'C'D' par *abc*.

Alors remarquons que l'inducteur et l'induit sont toujours parallèles. Seulement les deux sens sont à certains moments concordants, à d'autres ils diffèrent. Dans le premier cas, d'après une loi de l'électro-dynamique, les deux circuits s'attirent ; dans le second c'est une répulsion que l'on observe.

On a marqué, dans le diagramme précédent, les périodes d'attraction et de répulsion et l'on voit que les dernières l'emportent sur les autres par la durée et par l'intensité des courants ; le fait résultant doit donc être une répulsion et l'expérience le vérifie.

Ces réactions interviennent dans l'explication de la marche de certains moteurs électriques.

CHAPITRE V

BOBINE DE RUHMKORFF

Principe. — Elle repose sur les phénomènes d'induction mutuelle et comprend deux bobines concentriques avec noyau de fer doux. Ce métal est immédiatement recouvert de la bobine inductrice à fil gros et relativement court. Son diamètre a de deux à trois millimètres, et sa longueur est d'une cinquantaine de mètres dans les bobines de moyen modèle ; B et C sont les extrémités de cette première bobine. Elle est

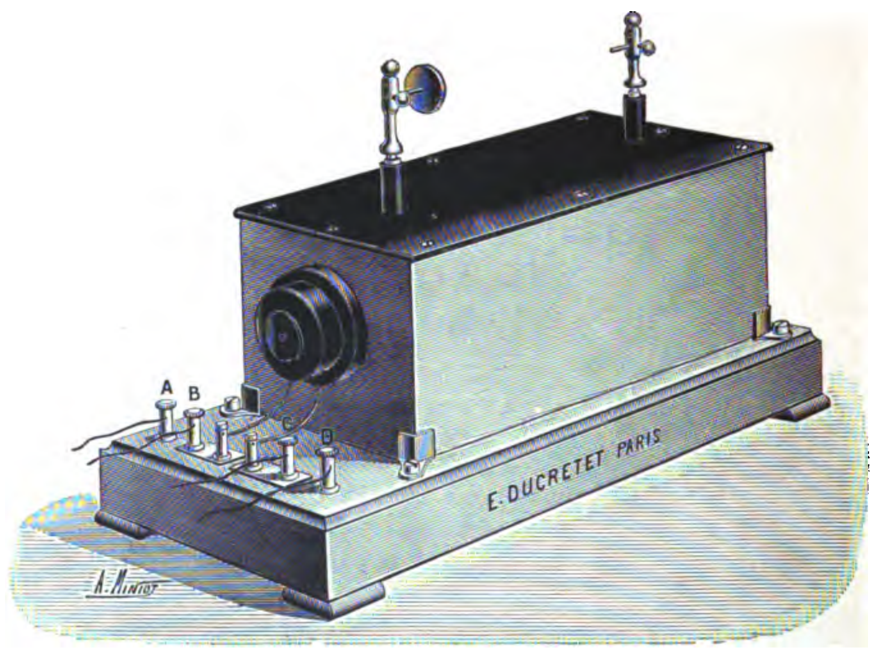


Fig. 228

recouverte d'un isolant et sur cette enveloppe est disposé le fil induit, de très faible section, mais de longueur considérable (jusqu'à 100.000 mètres et davantage). Supposons qu'à un moment donné, on lance un courant dans la bobine inductrice : le champ magnétique prend subitement naissance, et le flux est renforcé par la présence du fer. Le passage de ce flux produit alors un courant dans chaque spire de la bobine induite ;

tous ces effets s'ajoutent si on considère toutes les spires et l'ensemble donne une différence de potentiel énorme, opposée à celle du courant inducteur. On doit veiller d'une manière toute spéciale à l'isolement des fils et en outre il faut éviter de placer côte à côte deux conducteurs présentant l'un sur l'autre une différence notable de potentiel ; ce fait se produirait évidemment si la bobine induite était enroulée, à la manière ordinaire, sur toute la longueur du noyau et alors, entre deux couches voisines pourrait se produire une étincelle à travers les isolants des fils. Ce grave inconvénient est évité par le partage du circuit en un certain nombre de segments que l'on juxtapose sur le fil inducteur. Toutes ces bobines partielles sont connectées en tension et de la sorte, la différence de potentiel entre deux fils voisins n'est qu'une faible fraction de la force électromotrice induite totale. Le tout est empâté dans un isolant et enfermé dans une boite portant, comme on le voit, les deux extrémités de l'induit à sa partie supérieure.

Dès que le passage de l'électricité est établi d'une manière permanente dans le gros fil, l'induction cesse mais le phénomène recommence, dans le sens opposé au premier, quand nous faisons cesser le courant inducteur.

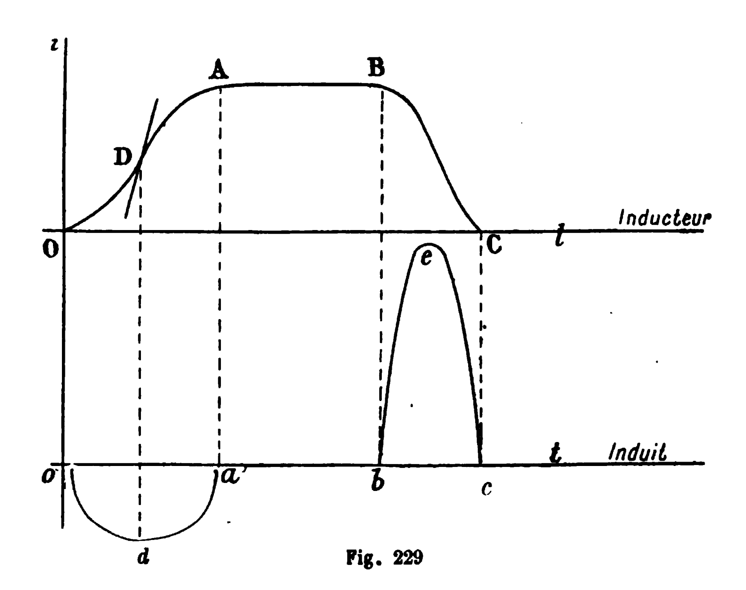


Fig. 229

Représentons graphiquement les faits : supposons que le courant inducteur soit figuré par la courbe OABC ; nous le voyons croître suivant une certaine loi puis atteindre un état stationnaire AB et enfin décroître jusqu'à zéro suivant la courbe BC.

A la période d'établissement OA correspond un courant inverse ; il croît d'abord jusqu'à un maximun (qui a lieu au moment du point d'inflexion D de la courbe OA) puis finit par s'annuler quand le régime stationnaire est atteint en A.

Pendant tout le temps AB, il n'y a pas d'induction et la fin de l'inducteur est marquée par le courant induit *bec* direct.

Si l'on peut reproduire le même courant inducteur un certain nombre de fois, on obtient les mêmes effets à chaque opération.

Il s'agit donc de couper et de rétablir le courant inducteur d'une façon automatique on y arrive par le jeu de l'interrupteur.

Interrupteur. — Les systèmes que l'on peut employer sont très nombreux. Le modèle classique consiste en un levier BO portant une pièce magnétique en O (fig. 230). Ce levier appuie sur un ressort DC et on dispose les communications de telle manière que le courant inducteur suive le chemin BOC en traversant le contact OD. Dès que le courant est établi, l'attraction du noyau soulève le levier et rompt par suite le circuit. Ce circuit rompu, la force attractive cesse d'agir et BO retombe sur son support en rétablissant le courant. Les mêmes effets se reproduisent d'ailleurs indéfiniment de sorte qu'on obtient un induit composé d'une suite de courants alternativement dans un sens et dans l'autre, et séparés par des intervalles de repos.

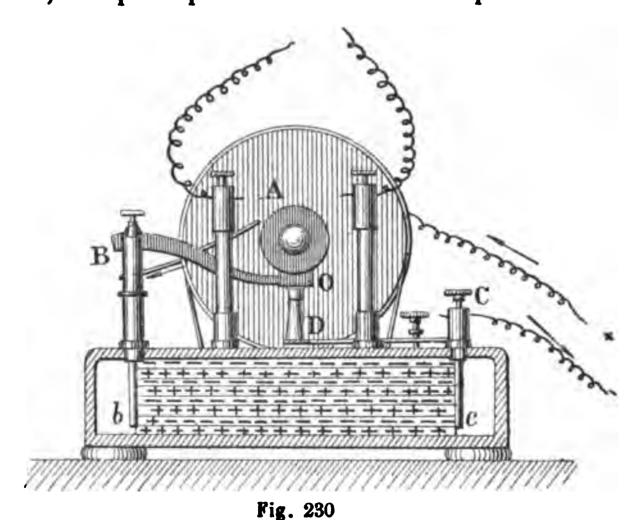


Fig. 230

Dans d'autres modèles, la pièce essentielle est toujours un électro et l'on emploie un levier élastique dont on règle la tension par une vis. On peut ainsi modifier la fréquence des interruptions entre des limites très écartées.

Les bobines d'induction actuelles sont ordinairement indépendantes de leur interrupteur. Le modèle *Ducretet* représenté (fig. 228) est dans ce cas. Il est destiné à être relié à l'interrupteur que l'on voit (fig. 231). La pièce essentielle de cet appareil est un petit moteur électrique M alimenté par un circuit spécial d'accumulateurs A*cc*'. Sous l'influence du courant de cette petite batterie, le moteur tourne et on transforme son mouvement de rotation en un déplacement rectiligne de va-et-vient par l'excentrique E*x*. Une tige métallique T se trouve alors alternativement plongée dans une cuvette C renfermant du mercure et soulevée au-dessus du liquide conducteur. Le courant principal, venant de la batterie A*cc*, aboutit, par une de ses extrémités à la cuvette et il continue sa route par la tige T ; il en résulte donc une *interruption* du courant quand la tige est soulevée au-dessus du mercure, un rétablissement au contraire au moment où cette même tige vient plonger dans le liquide. Le moteur étant muni d'un rhéostat, il est

facile de modifier entre des limites très étendues la vitesse de rotation et par suite la rapidité des interruptions.

Parmi tous les interrupteurs imaginés dans ces derniers temps, signalons le modèle *Wenhelt* qui repose sur un fait tout différent des autres : quand on fait passer un courant dans un électrolyte par des électrodes d'inégale surface, et en employant une force électromotrice considérable, on observe des phénomènes calorifiques et lumineux sur la petite électrode. En même temps un son plus ou moins élevé prend naissance : il est dû à des *intermittences* rapides du courant et l'on peut, d'après la *hauteur* du son obtenu, déterminer le nombre des interruptions du courant. Cet appareil *électrolytique* inséré sur le courant inducteur de la bobine de Ruhmkorff réalise donc les mêmes phénomènes que les interrupteurs précédents; il permet d'atteindre des fréquences très considérables, et on l'a adopté dans un certain nombre de cas. Le liquide est l'acide sulfurique au $\frac{1}{10}$; l'une des électrodes (—) est formée par les parois mêmes d'un vase de plomb; l'autre, l'extrémité +, est réalisée par un tube fin rempli de mercure et, dans la paroi duquel est soudé un fil de platine. La force électromotrice employée varie de 70 à 120 volts.

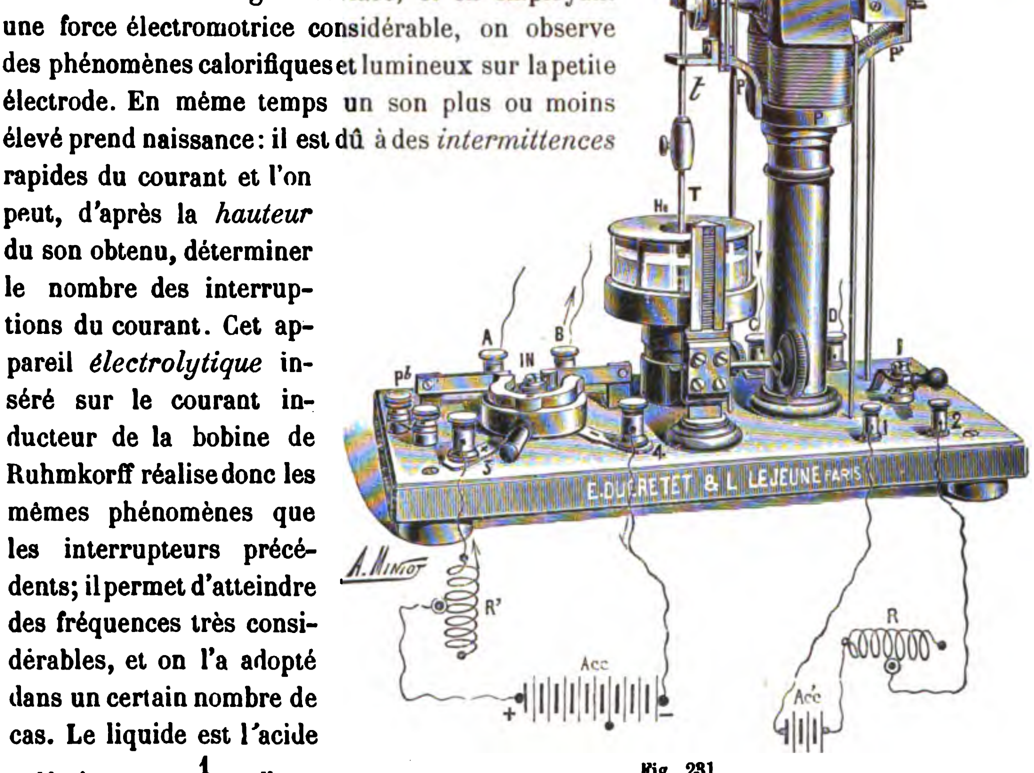


Fig. 231

Condensateur. — A chaque interruption du courant inducteur, la self-induction agit dans le circuit d'une façon très intense, étant donnée la disposition même de la bobine (enroulée sur un noyau de fer). Les rétablissements sont aussi marqués par des extra-courants.

Ces phénomènes ont, en plus de leurs inconvénients ordinaires, la propriété d'augmenter les périodes variables de l'inducteur, et, par suite, de diminuer la force électromotrice d'induction qui est en raison inverse de la durée de la modification.

Pour combattre la self-induction on emploie un condensateur, que l'on place en dérivation sur l'inducteur comme on le voit sur la figure 230.

Le condensateur se compose d'une série de feuilles d'étain isolées les unes des autres par du papier et communiquant entre elles de deux en deux. Toutes les lames de même parité constituent l'un des pôles, celles de parité différente forment la seconde armature. Le rôle de cet instrument est facile à saisir : l'extra-courant de rupture, au lieu de passer sous forme d'étincelle d'une pièce à l'autre du contact, trouve à se loger dans l'une des armatures, celle qui communique avec B (puisque l'extra-courant est direct). La seconde armature se charge d'électricité contraire. Mais aussitôt la décharge peut s'opérer : il y a en effet communication permanente par la bobine et par la source. Ce courant de décharge est contraire au courant principal, de sorte que les interruptions sont ainsi rendues plus brèves et l'induit augmente en tension.

Usages — La bobine de Ruhmkorff est souvent employée pour la production d'étincelles ou de décharges que nous étudierons plus tard.

Quand on veut constater l'étincelle, on écarte l'un de l'autre deux conducteurs reliés respectivement aux deux extrémités de la bobine induite. Suivant la force électromotrice d'induction que l'on obtient, l'étincelle est plus ou moins longue.

En général, elle n'est pas très nourrie car elle manque de *quantité*. On corrige cet inconvénient, si on le juge utile, au moyen d'un nouveau condensateur dont on relie les armatures aux deux pôles de la bobine. C'est alors ce condensateur que l'on décharge : les étincelles sont moins nombreuses mais plus grosses.

Aujourd'hui, la bobine de Ruhmkorff a trouvé de nouveaux emplois dans la production des rayons X de Rœntgen, dans la télégraphie sans conducteurs et dans une foule d'applications scientifiques.

Construite sous une forme plus réduite elle est très employée pour l'allumage des moteurs à gaz et à pétrole, pour mettre le feu aux mines, à distance, dans l'industrie et dans l'art militaire.

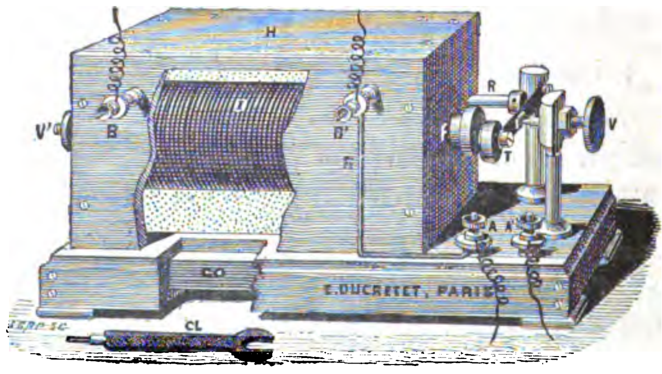


Fig. 232

La figure 232 représente un modèle spécial à l'allumage; on voit toutes les pièces ordinaires de la bobine : interrupteur, condensateur, etc.

CHAPITRE VI

INDUCTION DANS LES MASSES CONDUCTRICES

Expérience d'Arago. — Arago réalisa, en 1824, avant la découverte des phénomènes d'induction, une curieuse expérience : un disque de cuivre tournant au-dessus d'une aiguille aimantée mobile, entraînait cette aiguille à sa suite.

Cette expérience inexpliquée d'abord fit croire à une nouvelle propriété : le *magnétisme de rotation*. En réalité c'est un cas particulier de l'induction : *un conducteur quelconque déplacé dans un champ magnétique est le siège de courants induits.*

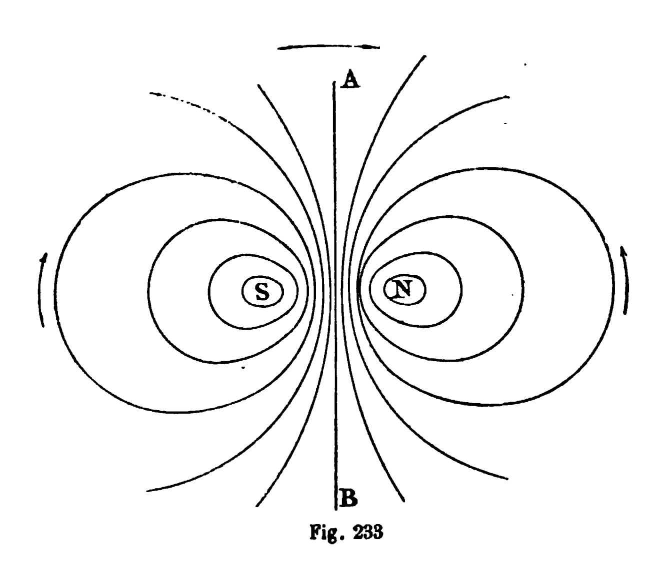


Fig. 233

La différence avec les cas étudiés précédemment est que, dans les conducteurs de forme non linéaire, les courants induits se ferment sur eux-mêmes. La figure 233 représente une portion de disque tournant de gauche à droite au-dessus d'un pôle Nord qui se projette au centre de la figure. Nous connaissons le sens des courants particulaires du pôle ; il est inverse de celui des aiguilles d'une montre. Considérons la partie S du métal qui s'approche du pôle : les induits y sont contraires des courants

d'Ampère, donc leur sens est celui des aiguilles de montre ; les effets sont opposés dans la portion N qui s'éloigne du centre. Dès lors cette dernière attire le pôle ; l'autre repousse ce même pôle et ces deux actions concordent pour faire marcher l'aiguille dans le sens du mouvement du plateau

Autres cas d'induction — Ces phénomènes d'induction peuvent se manifester dans d'autres circonstances :

Soit un disque tournant entre les mâchoires d'un électro-aimant. Tant que le courant ne passe pas dans le fil, le disque se déplace avec la plus grande facilité. Mais dès que le courant est établi, le métal éprouve une énorme résistance. L'effet est bien dû à des courants fermés comme on l'a indiqué, car si on pratique des traits de scie suivant les rayons, on l'empêche de se produire ; le même résultat est d'ailleurs atteint si on forme le disque de couronnes séparées par une matière isolante. Par ces moyens de division du plateau, on empêche en effet les courants de se fermer sur eux-mêmes.

Ces courants dans les masses non linéaires prennent le nom de *courants de Foucault.*

On peut les mettre en évidence par de nouveaux moyens que nous allons indiquer :
1° Reprenons, comme dans l'expérience d'Arago, un disque et un barreau mobiles. Imprimons le mouvement à l'aimant ; des courants se développent dans le plateau conformément à ce qu'on a vu et, d'après la loi de Lenz, ils s'opposent à la continuation de la rotation ; la conséquence de cette loi est un déplacement du disque dans le même sens que le barreau ; alors, en effet, le mouvement relatif des deux pièces se trouve supprimé et la loi de Lenz est satisfaite.

Nous pouvons tirer de ce cas une règle utile dans la pratique ; l'aimant entraîne avec lui ses lignes de force, qui traversent le conducteur, et ce conducteur tend à suivre le déplacement du champ.

Ces réactions s'appliquent à toutes sortes de cas comme nous le verrons dans la suite ;

2° Soit encore un petit cube de cuivre ; on le suspend par un fil entre les deux pôles d'un électro-aimant. Si le fil de suspension a été tordu, le cube abandonné à lui-même, et en l'absence du courant, se met à tourner avec une certaine vitesse. Ce mouvement est arrêté instantanément quand l'électricité est envoyée dans le fil de l'électro. Ce sont alors les courants de Foucault qui s'opposent, d'après la règle de Lenz, à la continuation de la rotation.

Applications. — 1° On a mis à profit ces courants dans la construction des *galvanomètres dits apériodiques*. Lorsqu'on fait une mesure, les oscillations nombreuses de l'aiguille sont gênantes pour l'observation ; on les évite en plaçant l'aimant mobile dans une cavité métallique ou à proximité d'une masse assez considérable de métal, cuivre ordinairement. Cette substance est le siège, pendant les déplacements

de l'aiguille, de courants de Foucault qui s'opposent à la continuation des mouvements. On voit (fig. 234) la coupe du système Wiedeman; l'aiguille en fer à cheval est située dans une sphère de cuivre massive creusée d'une cavité permettant les déplacements de l'aimant.

2° Nous verrons dans certains appareils électriques, compteurs par exemple, d'autres applications du même genre.

3° Enfin, Foucault a eu l'idée d'employer ses courants dans un but tout différent : supposons que l'on fasse tourner un disque dans le champ d'un fort électro; on doit vaincre pour cela les forces électro-magnétiques dues aux courants induits et ce travail, que l'on dépense échauffe le disque. La chaleur engendrée ainsi est mesurable; on peut aussi évaluer le travail dépensé pour effectuer la rotation. Ces deux quantités doivent être équivalentes.

Fig. 234

Foucault se servait de l'appareil représenté (fig. 235) : le disque est entraîné par la rotation d'une manivelle; on mesure le travail au frein. Quant au disque chaud on le transporte dans un calorimètre et on évalue la chaleur qu'il a reçue.

Le rapport du travail à la chaleur donne un nombre ne différant pas beaucoup de celui de Joule.

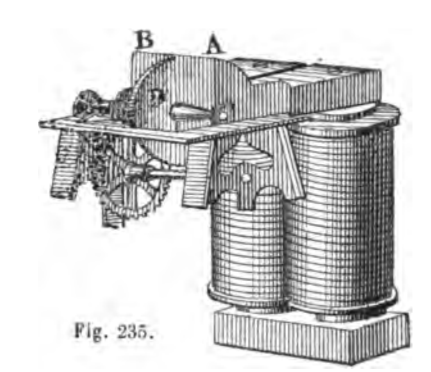
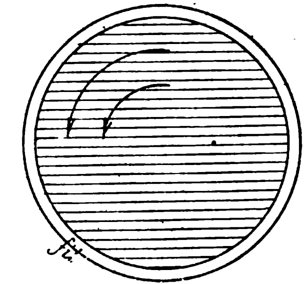


Fig. 235.

Courants de Foucault dans les noyaux d'électro-aimants. — Supposons un noyau de fer entouré d'une bobine. Les effets d'induction ne sont pas à considérer si le courant envoyé dans la bobine est continu. Mais il n'en est plus de même dans le cas des courants alternatifs : des courants induits se propagent continuellement dans le fer suivant des directions parallèles à celle du fil. Le résultat de ces courants de Foucault est d'absorber une certaine quantité d'énergie. Non seulement ce travail est perdu, mais il se transforme en chaleur : le noyau et les fils s'échauffent. On évite ou du moins on atténue ces effets nuisibles en divisant la masse de fer; on peut faire usage ou de fils vernis réunis en faisceau ou encore de lames séparées par du papier paraffiné ou par tout autre isolant (fig. 236). On remarque d'ailleurs que la place perdue par la présence de l'isolant est plus grande dans le cas des fils que dans le cas des lames. Par ces dispositions, les courants de Foucault se trouvent fractionnés et n'exercent plus qu'une action négligeable ordinairement.


Fig. 236

Dans la construction des dynamos, on fait usage d'électros de forme annulaire. Le noyau est un tore de fer ou le plus souvent une portion de tube ; les courants de Foucault sont parallèles aux fils enroulés. On les empêche en formant l'anneau d'un

grand nombre de fils isolés au vernis, ou, plus pratiquement, d'un certain nombre de lames séparées aussi et empilées (fig. 237). Chaque lame a ainsi la forme d'une couronne, mais dans les machines puissantes, chaque anneau comprend plusieurs parties distinctes.

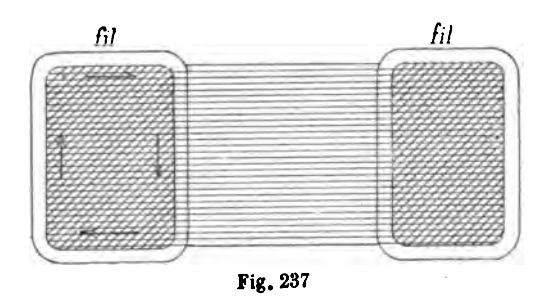


Fig. 237

Remarquons que la disposition adoptée pour combattre les courants de Foucault n'empêche pas du tout la perte d'énergie par hystérésis qui dépend seulement du volume total du fer.

Self-induction dans un fil de grande section. — Nous n'envisageons que le cas des courants alternatifs. D'après la loi de Lenz, les courants induits sont toujours opposés aux inducteurs ; ils diminuent donc le courant principal.

Divisons par la pensée le conducteur en un grand nombre de fils élémentaires ; la diminution du courant par la self-induction se fait d'autant plus sentir que les fils sont plus serrés les uns contre les autres. L'action a donc son maximum vers l'axe. Sur le pourtour, au contraire, la réaction est moindre. De sorte qu'en résumé le courant se porte surtout vers la périphérie du conducteur. Ce raisonnement nous indique qu'un fil cylindrique possède un coefficient de self-induction spécial et sa résistance pour courants alternatifs est plus grande que celle qu'il oppose aux courants continus. L'effet d'ailleurs est d'autant plus marqué que le fil est plus gros et que la fréquence du courant est plus considérable.

Puisque la partie centrale du fil est peu utile pour la transmission du courant, on la supprime quelquefois et on forme alors un tube creux ce qui augmente la surface latérale et par suite les régions utiles.

CHAPITRE VII

DÉCHARGE ÉLECTRIQUE

Deux sortes de décharges. — Quand on provoque la décharge d'un corps électrisé en l'unissant au sol ou encore celle d'un condensateur dont on joint les deux armatures par un conducteur, le phénomène se présente sous deux manières d'être très différentes. Dans tous les cas, il y a déperdition de l'énergie accumulée, mais ce travail peut être consommé :

1° Dans le corps qui établit la communication, surtout. La décharge est alors dite *conductive* ;

2° Par le passage brusque de l'électricité à travers le diélectique qui sépare les conducteurs au moment de la décharge. Alors la décharge est *disruptive*.

Décharge conductive. — D'une manière générale, on peut dire que le phénomène se traduit par un dégagement de chaleur qui est lié à la résistance du conducteur interposé. Il en résulte l'incandescence du fil, ou sa fusion ou même sa volatilisation. Bien des expériences de cours, sur lesquelles nous n'insistons pas, reposent sur ce fait. En même temps que les métaux sont ainsi volatilisés ou fondus, il y a un violent ébranlement du milieu extérieur.

Cette décharge conductive peut encore se produire par l'intermédiaire de certains diélectriques et on observe comme conséquence des travaux mécaniques divers : ruptures, déchirements, etc. : un carton est percé par la décharge ; une lame de verre de grande épaisseur subit le même sort. Enfin, indiquons dans le même genre de décharge l'effet produit par la surface même des isolants : tubes et carreaux étincelants, figures roriques, etc.

Décharge disruptive. — Elle se présente sous des aspects que l'on ramène à trois : les *lueurs*, l'*aigrette* et l'*étincelle*. Les lueurs se produisent dans les gaz raréfiés; l'aigrette et l'étincelle peuvent avoir lieu dans l'air ou dans les gaz à la pression ordinaire. Ce qui les différencie est la quantité d'électricité transportée, l'étincelle jaillissant quand la capacité du conducteur déchargé est considérable.

Lueurs. — Supposons que l'on prenne l'appareil désigné sous le nom d'œuf électrique; c'est un vase de forme ovoïde avec garnitures et robinet permettant d'y faire le vide.

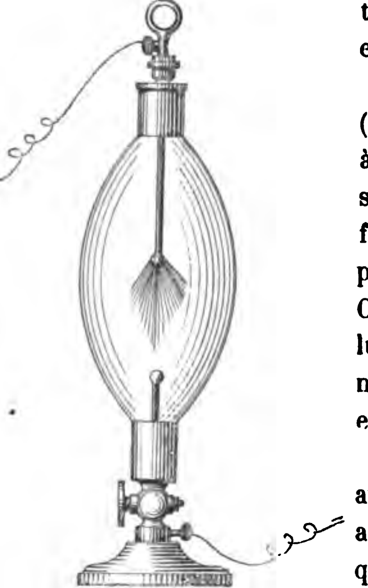


Fig. 238

Deux conducteurs isolés pénètrent dans ce récipient (fig. 238) et on peut faire passer l'électricité de l'un à l'autre, soit au moyen d'une bobine de Ruhmkorff, soit avec un condensateur chargé. Quand le vide est fait à 1 ou 2 millimètres, on voit une lueur partir d'un pôle (le pôle +), et se diriger vers l'autre conducteur. Ce dernier d'ailleurs n'est pas en contact avec la gerbe lumineuse qui s'arrête à quelque distance de la tige négative. Ordinairement ce conducteur est entièrement enveloppé d'une zone violette.

L'aspect et la couleur de la lueur varient d'ailleurs avec la nature du gaz introduit dans l'œuf et aussi avec la pression atteinte. Si le vide est plus poussé que le précédent, on aperçoit des strates claires et obscures alternativement.

Les tubes de Gessler (fig. 239) permettent de voir facilement ces lueurs dues à la décharge. Suivant la forme, le gaz enfermé, le degré de vide, etc., on a des effets extrêmement variés.

Enfin un vide plus parfait encore donne un phénomène d'un nouveau genre: la lueur intérieure cesse, mais le verre prend, dans la région opposée à l'électrode —, une très belle fluorescence, que l'on a attribuée (Crookes) au bombardement de la paroi par les molécules gazeuses laissées dans l'ampoule. Ce flux intérieur émané du pôle — a reçu le nom de *flux cathodique*.

Il semble subir, à la surface du verre, une transformation, au moins partielle, en radiations douées de qualités spéciales, *les rayons X de Rœntgen*.

Fig. 239

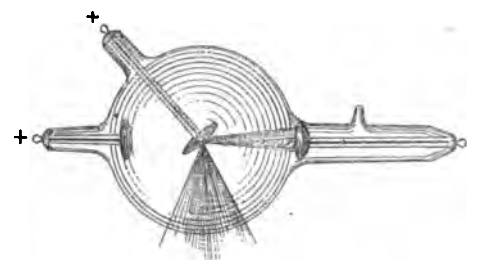


Fig. 240

La production de ces rayons est corrélative de la fluorescence du verre. On sait que ces radiations ont la propriété de traverser certaines substances opaques à la lumière et de produire au delà l'impression de plaques photographiques ou l'illumination d'écrans fluorescents. De là sont nés les deux procédés : *radiographie* et *radioscopie*, qui rendent des services aux sciences médicales et que l'on utilise encore dans une foule d'autres circonstances.

Aigrette. — Elle semble partir du pôle positif sous forme d'un trait lumineux qui se ramifie ensuite. Le conducteur négatif est également éclairé et, en même temps que l'aigrette se produit, on perçoit un bruissement particulier.

Étincelle. — C'est un trait de feu accompagné toujours d'un bruit sec dû à l'ébranlement du milieu. Suivant les conditions de la décharge, la forme de l'étincelle varie : quand la distance à parcourir est faible, l'étincelle est rectiligne; pour une plus grande longueur, elle devient sinueuse avec ramifications dirigées vers les corps voisins, à moins toutefois que la quantité d'électricité transportée ne soit grande ; alors l'étincelle est en zigzag.

La distance à laquelle jaillit l'étincelle dépend de plusieurs conditions ; il faut tenir compte d'abord de la forme terminale des conducteurs entre lesquels elle se produit et de la pression de l'air ou du gaz ambiant. Si l'on se place dans des conditions données : conducteurs et pression, la distance explosive dépend de la différence de potentiel des corps. Considérons deux boules d'un centimètre de diamètre ; à une distance explosive de 1 millimètre correspond une différence de niveau de 4.830 volts, à 1 centimètre : 25.440 et à 10 : 56.100 volts. La relation entre le voltage et la distance est indiquée par une courbe de la forme ci-contre (fig. 241). Ces chiffres considérables nous montrent que, pour les voltages courants, on n'a pas à craindre la production d'un arc électrique entre deux fils voisins même très rapprochés.

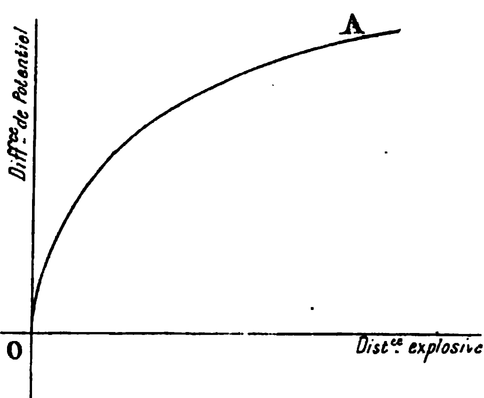


Fig. 241

Le passage de l'étincelle électrique peut donner lieu à des effets très variés. La décharge se produisant à travers le corps humain est toujours accompagnée d'une contraction musculaire dont la violence dépend de la différence de potentiel et de la quantité d'électricité déplacée. Cette commotion, convenablement réglée, est quelquefois employée comme agent thérapeutique.

Les effets chimiques de l'étincelle consistent en des combinaisons et des décompositions : les mélanges de gaz combustibles et d'oxygène détonent sous l'action de l'étincelle : la combustion se produit ; inversement une série d'étincelles jaillissant dans certains gaz, l'ammoniaque par exemple, provoquent la décomposition du corps. Enfin la décharge peut encore produire la transformation moléculaire de certaines substances : l'oxygène s'ozonise sous l'influence de l'*effluve*, c'est-à-dire par l'action d'une suite d'aigrettes.

Nature de la décharge. — Nous avons laissé supposer que la décharge consiste en un écoulement d'électricité d'un niveau à un autre. En réalité, il n'en est pas toujours ainsi ; si la résistance des conducteurs est suffisamment réduite, toutes choses égales d'ailleurs, la décharge unique se transforme en une série d'étincelles de plus en plus faibles, mais également espacées. L'observation du phénomène dans un miroir tournant confirme ce fait. Il en résulte que le courant de décharge est une sorte de

courant alternatif qui va en s'affaiblissant et qui finit par s'annuler. La figure 242 représente cette décharge dite *oscillante*. On a comparé le phénomène au mouvement d'un liquide dans des tubes communicants à partir du moment où l'on établit la communication : le niveau s'élève dans le tube vide au début ; il dépasse la hauteur normale et y revient après une série d'oscillations. Il y a également analogie entre le diélectique et un ressort bandé que l'on abandonne tout à coup à lui-même ; l'un et l'autre exécutent, pour reprendre leur état stationnaire, une suite d'oscillations en rapport avec les résistances rencontrées.

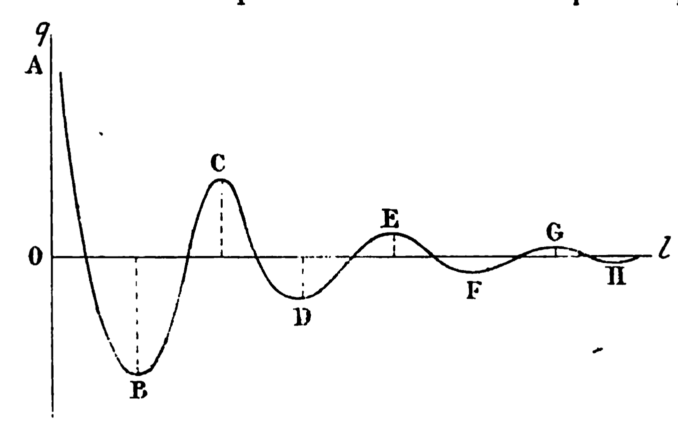


Fig. 242

La fréquence des oscillations électriques peut être facilement réglée entre certaines limites : on l'augmente si on diminue le coefficient de self-induction du conducteur de décharge. Au contraire, les oscillations deviennent plus lentes si on accroît l'induction propre.

La décharge, dans ces conditions, est donc comparable au mouvement vibratoire qui donne le son ou à celui qui produit la lumière.

Ondes électriques. — Cherchons si l'on peut suivre davantage l'analogie constatée entre la production d'un son et la décharge oscillante.

Le corps sonore émet des ondes qui se propagent dans l'espace et que l'on met en évidence au moyen d'un diapason accordé à l'unisson avec la source ; ce diapason vibre par résonance si on le met à proximité du corps sonore. Mais, de plus, ces ondes peuvent se réfléchir sur un obstacle et retourner en arrière en se combinant avec les ondes venues directement. Le résultat de cette interférence est la production d'*ondes fixes* caractérisées par des *ventres* et des *nœuds* de vibration, dont la position est invariable.

Le diapason, porté aux ventres vibre spontanément ; il reste au contraire silencieux s'il est placé dans la position des nœuds.

Pour tenter l'expérience électrique analogue, on doit reproduire continuellement la décharge oscillante et on y arrive au moyen d'une bobine de Ruhmkorff dont les pôles sont reliés à deux sphères A et B ou à deux plateaux d'une certaine capacité (fig. 243). Un petit intervalle

Fig. 243

est ménagé entre les conducteurs *a* et *b* terminés par de petites boules. L'étincelle oscille entre ces boules et on a là un appareil nommé *vibrateur*. On prend, d'autre part, un *résonateur*, de forme analogue au vibrateur, mais sans bobine, et pouvant vibrer à l'unisson de ce vibrateur.

Si on le transporte dans l'espace devant le premier appareil, on voit des étincelles jaillir entre les deux conducteurs séparés. Ce phénomène nous montre déjà la propagation du mouvement oscillatoire électrique dans l'espace. On constate l'opacité de certaines matières (corps bons conducteurs) ou la transparence d'autres substances (isolants). De plus, il est possible, en installant un corps opaque, de montrer les ondes fixes dans la région comprise entre lui et le vibrateur. La matière opaque s'est donc comportée comme un corps réflecteur.

En faisant usage du dispositif indiqué, Hertz a pu étendre aux ondes électriques toutes les propriétés des ondes lumineuses : réflexion, réfraction, propagation rectiligne, polarisation, etc.

La vitesse de propagation de ces ondes égale la vitesse de la lumière.

Nous verrons plus loin l'application qu'on a faite de cette propagation à la télégraphie sans fil.

L'analogie entre les phénomènes électriques et lumineux est donc complète ; la différence est la rapidité des vibrations. Dans les expériences de Hertz et autres, la fréquence atteint quelques milliers ; tandis que la lumière jaune (partie moyenne du spectre) est produite par 500 trillions de vibrations à la seconde. Ce mouvement très rapide de l'éther est, dans la théorie électro-magnétique de la lumière, considéré comme étant de nature électrique. On a donc essayé d'augmenter le plus possible la fréquence des oscillations électriques dans l'espoir d'obtenir la lumière directement par l'électricité.

Nous allons étudier rapidement quelques-unes des propriétés de ces courants de haute fréquence.

Propriétés des courants de haute fréquence. — Le moyen le plus pratique pour l'obtention de ces courants est encore l'utilisation de la décharge oscillante d'un condensateur.

Ce condensateur, que l'on peut d'ailleurs partager en deux moitiés, comme l'indique le schéma (fig. 244), est en communication permanente soit avec une bobine de Ruhmkorff, soit avec un transformateur [1]. Dans les deux cas on a des courants de sens alternés.

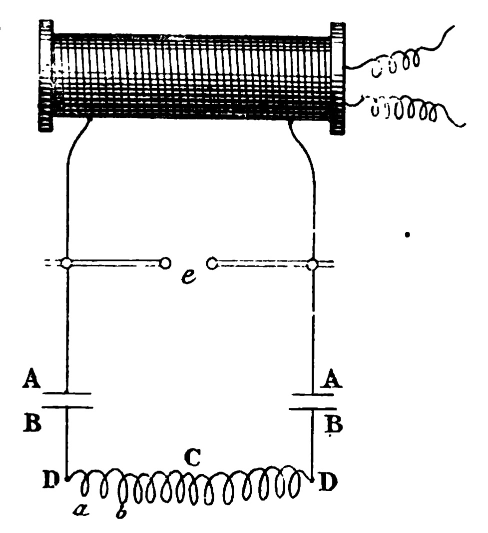


Fig. 244

Un excitateur *e* permet à l'étincelle de jaillir et provoque les oscillations. Nous obtenons

1. Appareil destiné à élever la tension des courants alternatifs aux dépens de leur intensité. C'est une bobine de Ruhmkorff sans interrupteur et sans condensateur.

ainsi, entre les deux armatures BB des condensateurs, un courant de haute fréquence qui peut être utilisé dans le fil C.

Ces courants de haute fréquence présentent des propriétés importantes : 1° En vertu de la rapidité des changements de sens, les effets d'induction produits par eux sont considérables $\left(e = \frac{d\mathcal{N}}{dt}\right)$. L'appareil indiqué nous permet de réaliser un certain nombre d'expériences ; on forme le fil C d'un conducteur demi-circulaire et de forte section et, en dérivation entre les extrémités D, on branche une lampe à incandescence de voltage approprié (fig. 245).

Fig. 245

Contrairement aux indications de la loi des courants dérivés, le filament rougit quoique le conducteur de cuivre ait une résistance nulle.

La même lampe accrochée aux points a et b du conducteur C (fig. 244) s'illumine également.

Ces effets sont toujours dus à la self-induction ; mais l'induction mutuelle est aussi exaltée ; une seule boucle de fil disposée autour du conducteur C porte au blanc une lampe convenable ;

2° Les effets physiologiques ont été examinés surtout par M. d'Arsonval : quand la fréquence est suffisante, les courants alternatifs, généralement si dangereux, sont inoffensifs. Un opérateur peut tenir lieu du conducteur C s'il saisit à pleines mains les extrémités métalliques D. Le corps est cependant traversé par un courant suffisant pour l'allumage d'une lampe.

Si l'on veut joindre à la haute fréquence une grande tension, les effets deviennent encore plus curieux. Pour augmenter la force électromotrice, on fait usage d'une seconde transformation du courant : les points D sont réunis par un solénoïde formé d'un petit nombre de spires, et autour de ce fil est disposée une seconde bobine comprenant, en une seule couche, un grand nombre de spires à fil fin. La tension du courant que nous employions précédemment se trouve multipliée par l'induction mutuelle, à tel point que l'on doit baigner dans l'huile ce nouveau transformateur pour éviter les décharges d'une spire à l'autre.

Malgré sa tension énorme, ce courant ne donne aucune commotion quand il traverse le corps humain.

Il possède la propriété d'illuminer des tubes, vides ou à peu près, des lampes à incandescence à filaments brisés par exemple, que l'on approche des bornes du transformateur. Le corps de l'opérateur peut d'ailleurs servir de conducteur ; il permet de tirer des étincelles de tous les corps métalliques d'une salle.

Enfin on peut créer un champ spécial entre deux surfaces métalliques reliées respectivement aux points D. Dans cet espace les ampoules vides diverses s'illuminent vivement sans qu'il soit nécessaire de les faire communiquer électriquement avec les pièces métalliques.

SIXIÈME PARTIE

MESURES ÉLECTRIQUES

CHAPITRE PREMIER

UNITÉS EMPLOYÉES

Principales grandeurs électriques. — Les phénomènes étudiés en électricité se ramènent à des actions mécaniques; les grandeurs électriques peuvent donc s'exprimer en fonction des unités de longueur, de masse et de temps.

Les principales de ces grandeurs sont :

1° *La quantité d'électricité* Q ;

2° *L'intensité de courant* I ;

3° *La résistance* R ;

4° *Le potentiel* ou la *force électromotrice* E ;

5° *La capacité électrique* C ;

6° *La quantité de magnétisme* m.

Relations entre les grandeurs électriques. — Entre les six grandeurs énoncées existent un certain nombre de relations :

1° On sait que l'*intensité* d'un courant I est la *quantité d'électricité* qui se déplace par unité de temps. Ainsi si Q est la charge mise en mouvement pendant un temps T, on a

$$(1) \qquad I = \frac{Q}{T}$$

2° La loi d'Ohm (page 68) nous donne la valeur de l'*intensité* du courant obtenu au moyen d'une *force électromotrice* E dans un conducteur de *résistance* R

$$(2) \qquad I = \frac{E}{R}$$

Nous savons, d'après la loi de Joule (page 83) que le *travail* produit pendant le temps T par un courant d'*intensité* I dans un conducteur de *résistance* R, est

$$(3) \qquad W = RI^2T$$

4° La *capacité électrique* C d'un conducteur (page 25) est la *quantité d'électricité* qu'il faut amener sur ce conducteur pour élever son *potentiel* de l'unité. Soit donc un corps primitivement neutre ; s'il prend, au potentiel E, la charge Q, on a la relation

$$(4) \qquad Q = C \times E$$

5° La loi de Laplace relative à l'action d'un élément ds de courant d'*intensité* I sur un pôle ayant une *quantité* m de *magnétisme*, placé à la distance r de l'élément, s'exprime par la formule

$$(5) \qquad dF = \frac{Km\,I\,ds \sin\alpha}{r^2}$$

où dF représente l'action, K une constante et α l'angle de la direction du pôle avec l'élément.

Ce sont là les seules équations que l'on puisse trouver pour relier les six quantités. Entre les six *unités* correspondantes règnent évidemment les mêmes relations. Ainsi, par exemple, l'unité d'intensité est celle d'un courant qui transporte l'unité d'électricité pendant l'unité de temps. On peut alors écrire, aussi bien que (1), avec la notation adoptée pour les unités

$$(1') \qquad [I] = \frac{[Q]}{[T]}$$

et de même :

$$(2') \qquad [I] = \frac{[E]}{[R]}$$

$$(3') \qquad [W] = [R]\,[I]^2\,[T]$$

$$(4') \qquad [Q] = [C] \times [E]$$

$$(5') \qquad [F] = K\,\frac{[m]\,[I]\,[L]\sin\alpha}{[r^2]}$$

Dans ces formules entrent des unités déjà connues, celles de temps, de travail, de force, de longueur. Donc avec *six* équations on pourrait résoudre le système par rapport aux *six unités* électriques et en fonction des unités fondamentales et mécaniques que nous connaissons. Mais le système est incomplet car nous n'avons que cinq équations et il y a indétermination.



Mais si l'on fixe, d'une manière quelconque, l'une des six unités électriques, il ne reste plus que cinq inconnues et les cinq relations permettent de les obtenir.

On peut fixer *a priori* la valeur de l'*une quelconque* des six unités. On obtient ainsi un système particulier. Avec un point de départ différent, le système est changé, de sorte que l'on peut avoir six combinaisons. Deux seulement sont adoptées; on part toujours soit des actions réciproques de deux corps électrisés (on forme ainsi le *système électrostatique*), soit des forces qui s'exercent de pôle d'aimant à pôle d'aimant (on a le *système électro-magnétique)*.

Système électrostatique. — Soient deux corps chargés d'une même quantité d'électricité q à une distance r; ils exercent l'un sur l'autre une action donnée par la loi de Coulomb :

$$= \frac{K'q^2}{r^2}$$

K' étant une constante.

L'unité de force est fixée d'avance, celle de longueur l'est aussi, mais l'unité de quantité d'électricité reste à déterminer. La valeur numérique q varie en raison inverse de cette unité; il s'ensuit que K' coefficient de proportionnalité doit dépendre du choix que l'on a fait (puisque toujours $K' \times q^2 = fr^2$, produit invariable pour deux charges égales données. Nous pouvons régler cette unité de manière à rendre K' égal à 1, dans le but de simplifier la formule de Coulomb. Alors les deux charges s'expriment par un nouveau nombre q_1 et nous avons :

$$f = \frac{q_1^2}{r^2}$$

Si les deux masses électriques sont placées à l'unité de distance ($r = 1$) elles se repoussent avec une force $f_1 = q_1^2$ égale numériquement au carré de la valeur de chacune d'elles. Remplaçons les deux charges que nous avons mises par d'autres (toujours égales entre elles). Leur répulsion change de valeur; nous nous arrêterons quand cette force, mesurée par un dynamomètre convenable, vaudra l'unité de force. Alors le carré de ces quantités d'électricité est égal à 1 et *chaque masse vaut elle-même* l'*unité*. Nous avons ainsi fixé l'*unité de quantité* d'une façon arbitraire :

L'unité de quantité dans le système électrostatique est la charge d'électricité qui repousse avec l'unité de force une autre charge égale placée à l'unité de distance.

Cette unité est donc subordonnée à celles de longueur et de force. Si les unités fondamentales adoptées sont les trois CGS, on a une unité électrostatique particulière :

L'unité électrostatique CGS de quantité est la charge d'électricité qui repousse avec une force d'une dyne une charge égale placée à un centimètre de distance.

Ayant usé de l'indétermination qui nous était laissée, nous n'avons plus maintenant qu'à appliquer les cinq équations pour obtenir les cinq unités restantes. Appliquons (1'); nous avons :



L'unité électrostatique CGS d'intensité est l'intensité d'un courant qui transporte par seconde une charge égale à l'unité précédemment définie.

De même en appliquant (3') que nous pouvons écrire identiquement :

$$[W] = [E] [I] [T]$$

nous voyons que :

L'unité électrostatique CGS de force électromotrice est celle d'une source qui produit par seconde un travail d'un erg quand l'intensité du courant vaut l'unité d'intensité CGS.

Nous connaissons maintenant [Q], [I] et [E]; la formule (2') nous donne :

L'unité de résistance, dans le système électrostatique, est la résistance d'un fil qui laisse passer un courant d'intensité 1 quand la force électromotrice est 1.

Les équations (4') et (5') donnent enfin les unités de capacité et de quantité de magnétisme; leur détermination ne présente aucune difficulté.

Système électro-magnétique. — Considérons l'action de deux pôles contenant les masses magnétiques m et m'; elle nous est donnée par la loi de Coulomb :

$$f = \frac{K \cdot m m'}{r^2}$$

K étant un coefficient et r la distance des pôles.

Opérons maintenant sur la quantité de magnétisme comme nous l'avons fait tout à l'heure au sujet de la quantité d'électricité : nous allons faire disparaître de la formule la constante K par un choix convenable de l'unité de magnétisme et nous aurons alors pour définition :

L'unité de quantité de magnétisme dans le système électro-magnétique est la masse magnétique qui repousse avec l'unité de force une masse égale située à l'unité de distance de la première.

Nous pouvons ainsi former le système électro-magnétique avec des unités fondamentales quelconques. Si ces dernières sont les unités CGS, nous avons le *système électro-magnétique CGS*.

Le point de départ est donc :

L'unité électro-magnétique CGS de magnétisme est la masse magnétique d'un pôle qui repousse avec la force d'une dyne une masse égale située à un centimètre de la première.

La relation (5') va nous permettre de passer à la définition de l'intensité unité ; prenons, en effet, un fil AB, de longueur égale à 1 centimètre, formant un arc de rayon 1, traversé par un courant d'intensité I et mettons au point O, centre, une masse magnétique valant l'unité ci-devant définie. La force qui agit sur cette masse a pour valeur :

A I O B

Fig. 246.

$$f = I$$

car en effet :

le coefficient K, le même qui figure dans la formule de Coulomb, a pour valeur 1;
$\alpha = 90°$, d'où $\sin \alpha = 1$,
m, ds et r valent tous 1.

En modifiant la valeur du courant, nous changeons la force électro-magnétique. Quand cette action est rendue égale à 1 dyne, l'intensité s'exprime par 1 (car $f = I$).

L'unité d'intensité dans le système électro-magnétique CGS est l'intensité du courant qui, formant un arc circulaire de longueur et de rayon égaux à 1 centimètre, exerce sur l'unité électro-magnétique CGS de magnétisme placée au centre, une force égale à 1 dyne.

La formule (1) nous donne tout de suite l'unité de quantité d'électricité :

L'unité électro-magnétique CGS de quantité d'électricité est la charge qui passe par seconde dans un fil traversé par l'unité d'intensité électro-magnétique CGS.

Nous allons déterminer [R] maintenant; pour cela servons-nous de (3).

L'énergie produite par le courant d'intensité I dans une résistance R est en une seconde.

$$W = R I^2$$

Prenons $I = 1$, il vient

$$W = R$$

Numériquement le travail obtenu égale la résistance. Si nous faisons en sorte que cette énergie soit d'un erg, nous avons $R = 1$, d'où :

L'unité électro-magnétique CGS de résistance est la résistance du conducteur dans lequel un courant d'intensité électro-magnétique CGS unité, dégage, sous forme de chaleur, l'unité d'énergie par seconde.

L'unité de potentiel n'est pas plus difficile à fixer : nous nous servirons de la loi d'Ohm; si nous prenons un conducteur de résistance unité, l'intensité a même valeur que la force électromotrice et si nous égalons cette intensité à l'unité, nous avons $E = 1$, d'où la définition :

L'unité électro-magnétique CGS de force électromotrice est la force électromotrice d'une source qui donne l'unité d'intensité dans un conducteur de résistance égale à 1 (Ces deux unités d'intensité et de résistance étant exprimées dans ce même système).

Il ne nous reste plus maintenant qu'à établir la valeur de l'unité de capacité. Nous le ferons au moyen de (4). Si $q = 1$ et $E = 1$, on a forcément $C = 1$, donc :

L'unité électro-magnétique de capacité est la capacité d'un conducteur qui se charge d'une quantité unité d'électricité sous la différence de potentiel unité. (Ces deux dernières étant exprimées dans le même système électro-magnétique CGS).

Unités pratiques. — Les valeurs des unités électriques CGS (électrostatiques ou électro-magnétiques) ne sont pas en rapport convenable avec les grandeurs rencontrées

dans la pratique. Les unes sont trop grandes, les autres trop petites.

Ainsi, par exemple, l'unité électro-magnétique CGS de résistance est la résistance d'un fil de cuivre d'un millimètre de diamètre et de $\frac{1}{20.000}$ millimètre de longueur.

L'unité de force électromotrice, dans le même système, est environ la cent millionième partie de la force électromotrice de l'élément Daniell.

Ces deux unités sont beaucoup trop petites pour les besoins ordinaires; d'un autre côté l'unité de capacité est bien trop grande : c'est la capacité d'une sphère de rayon égal à un million de fois celui de la terre.

Il en est de même pour les unités électrostatiques.

On a donc été conduit à remplacer ces unités par des multiples ou des sous-multiples décimaux de leurs valeurs. Le point de départ est toujours le système électro-magnétique. On forme ainsi un nouveau système, les *unités pratiques* qui reçoivent en général chacune un nom spécial.

Pour obtenir ce système nouveau on fait choix des unités de résistance et de force électromotrice :

1° *Résistance.* — On s'est proposé, par un choix convenable du facteur, de donner une valeur voisine de 1 à la résistance d'une colonne de mercure d'un millimètre carré de section et de longueur égale à un mètre. On doit pour cela multiplier l'unité électro-magnétique CGS par une certaine puissance de 10, positive ou négative. Cette puissance est 9 et on a donné à l'unité ainsi formée le nom d'*ohm*. On a :
1 ohm $= 10^9$ unités électro-magnétiques CGS; ce que nous écrivons par abréviation
1 ohm $= 10^9$ U E-M CGS;

2° *Force électromotrice.* — On fait en sorte que l'élément Daniell ait à peu près une f. é. m. égale à 1. On y arrive en prenant, pour nouvelle unité, une grandeur cent millions de fois plus grande que l'unité E-M CGS; on l'appelle *volt* et on a

$$1 \text{ volt} = 10^8 \text{ U E-M CGS}.$$

Ces deux unités une fois admises, toutes les autres se déduisent des formules générales de l'électricité. Ainsi la loi d'Ohm

$$I = \frac{E}{R}$$

ou

$$[I] = \frac{[E]}{[R]}$$

nous dit que l'intensité-unité, l'*ampère*, est l'intensité du courant donné par une différence de potentiel d'un volt dans un fil de résistance d'un ohm —. On opère de même pour toutes les autres grandeurs.

Mais il reste à s'entendre sur les valeurs mêmes des unités CGS qui servent de base.

L'*Association Britannique*, dès 1860, avait adopté des nombres déterminés; les Congrès des Électriciens, tenus à Paris en 1881 et en 1889, et à Chicago en 1893 ont

fait modifier un peu les chiffres primitifs et, à la suite du dernier congrès, un système a été adopté sous le nom de *Système international.*

Système international d'unités. — Il a été admis d'une façon officielle dans un certain nombre d'États, et un décret du 25 avril 1896 l'a rendu obligatoire dans les marchés passés pour le compte de la République française.

« Une seule unité, l'ohm, a reçu une définition dégagée de toute considération théo- « rique, une définition matérielle et définitive, à l'exemple de celle du mètre et du « kilogramme. Les deux autres unités ont conservé leur définition théorique, à la- « quelle on a joint l'énoncé d'une représentation suffisante pour les besoins de la pra- « tique. Il importe toutefois de remarquer que le volt a été subordonné à l'ampère. »

« Cette subordination rend le système plus correct en même temps qu'elle indique « au praticien le moyen qu'il préférera souvent pour mesurer une différence de poten- « tiel. Elle n'empêche point d'indiquer un élément de pile pouvant, dans des condi- « tions prescrites, servir d'étalon pratique de force électromotrice [1]. »

Voici les définitions adoptées officiellement pour les trois unités principales :

1° l'unité de résistance ou *ohm* est la résistance offerte à un courant invariable par une colonne de mercure à la température de la glace fondante, ayant une masse de 14,4521 grammes, une section constante et une longueur de 106,3 centimètres [2].

2° L'unité d'intensité, ou *ampère*, est le dixième de l'unité électro-magnétique de courant. Elle est suffisamment représentée pour les besoins de la pratique par un courant invariable qui dépose en une seconde 0,001118 gramme d'argent.

3° L'unité de force électromotrice, ou *volt*, est la force électromotrice qui soutient le courant d'un ampère dans un conducteur dont la résistance est d'un ohm. Elle est suffisamment représentée, pour les besoins de la pratique, par les 0,6974 ou $\frac{1000}{1434}$ de la force électromotrice d'un élément Latimer Clark [3].

Ces unités principales nous permettent de passer à toutes les autres qui peuvent se présenter.

Quantité d'électricité : l'unité est le *coulomb;* c'est la quantité d'électricité transportée en une seconde par un courant d'un ampère. Donc :

$$\text{Coulomb} = \text{ampère-seconde} = 10^{-1} \text{ U E-M CGS de quantité.}$$

Capacité. — L'unité pratique ou *farad* est la capacité d'un condensateur chargé au potentiel d'un volt par un coulomb. D'après la formule :

$$[C] = \frac{[Q]}{[E]}$$

1. Rapport de la commission des *Unités électriques*, M. Violle rapporteur.

2. On a remplacé la définition première de l'ohm, qui faisait intervenir la section de la colonne, par l'actuelle, surtout dans le but de « substituer une mesure précise de masse par la balance à une mesure irréalisable de section. »

Ce changement a été fait sur la proposition de l'*Association britannique*, en 1892.

3. Le rapport indique les règles à suivre, pour l'emploi de la définition pratique de l'ampère et pour la préparation du couple étalon. Nous y reviendrons quand nous parlerons des mesures.



on voit que

$$\text{Farad} = \frac{\text{coulomb}}{\text{volt}} = \frac{10^{-1}}{10^8} \text{ U E-M} \quad \text{CGS}$$

Ainsi

$$1 \text{ farad} = 10^{-9} \text{ U E-M de capacité.}$$

On prend aussi le microfarad ; c'est la millionième partie du farad.

$$1 \text{ microfarad} = 10^{-15} \text{ U E-M de capacité.}$$

Induction. — Nous avons vu que la force électromotrice d'un courant induit est donnée, en fonction du coefficient d'induction L, par la formule

$$e = L \frac{dI}{dt}$$

$\frac{dI}{dt}$ étant la variation d'intensité de l'inducteur par unité de temps (voir page 209).

L'unité d'induction, ou *henry*, est l'induction dans un circuit où la force électromotrice est un volt quand le courant varie à raison d'un ampère par seconde. On voit que

$$\text{Henry} = \frac{\text{volt}}{\text{ampère par unité de temps}} = \frac{10^8}{10^{-1}} = 10^9 \text{ unités CGS.}$$

Travail ou énergie. — On a vu que le passage d'une quantité q d'électricité du potentiel E au potentiel zéro donne un travail égal au produit : $q \times E$. Si la quantité d'électricité et la différence de niveau sont exprimées toutes deux en unités CGS, l'énergie est calculée en *ergs*. Mais si q est un nombre de *coulombs*, et E un nombre de *volts*, la multiplication fournit l'énergie en une unité nouvelle correspondant aux unités internationales adoptées. Cette unité de travail est le *joule*.

On a

$$[W] = [E] \times [Q]$$

ou

$$\text{Joule} = \text{volt} \times \text{coulomb}$$
$$= 10^8 \times 10^{-1} \text{ unités CGS}$$
$$10^7 \text{ ergs.}$$

Nous pouvons définir le *joule* comme : *le travail produit par un coulomb subissant une chute de niveau d'un volt;*
ou encore, puisque $W = RI^2$:
le joule est l'énergie dépensée en une seconde par un ampère dans une résistance d'un ohm.

On sait que :

$$1 \text{ kilogrammètre} = 9{,}81 \times 10^7 \text{ ergs}$$

donc :

$$1 \text{ kilogrammètre} = 9{,}81 \text{ joules}$$

et

$$1 \text{ joule} = \frac{1}{9{,}81} \text{ kilogrammètre.}$$

Puissance. — C'est l'énergie rapportée à l'unité de temps. L'unité de puissance est la puissance correspondant à un joule produit en une seconde ; on l'appelle *watt*.

On a

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ joule par seconde}$$

ou

$$1 \text{ watt} = 10^7 \text{ ergs par seconde}$$

$$= \frac{1}{9,81} \text{ kilogrammètre par seconde.}$$

On peut dire que le watt est la puissance d'une source donnant un courant d'un ampère au voltage unité.

Nous pouvons comparer cette unité de puissance à celle qu'on emploie ordinairement en mécanique, le cheval-vapeur. On sait que

$$1 \text{ cheval-vapeur} = 75 \text{ kilogrammètres par seconde}$$

$$= 75 \times 9,81 = 736 \text{ watts}$$

On en tire

$$1 \text{ watt} = \frac{1}{736} \text{ cheval-vapeur.}$$

Souvent on fait usage du *kilowatt*

$$1 \text{ kilowatt} = 1.000 \text{ watts}$$

$$= \frac{1.000}{736} = 1,35 \text{ cheval-vapeur.}$$

$$\left(\text{Approximativement } 1 \text{ kw} = \frac{4}{3} \text{ ch.-vap.}\right)$$

On a de même

$$1 \text{ cheval-vapeur} = \frac{736}{1.000} \text{ kilowatt}$$

$$\left(\text{Approximativement } 1 \text{ ch.-vap.} = \frac{3}{4} \text{ Kw.}\right)$$

CHAPITRE II

MESURE DES INTENSITÉS

Cette mesure peut s'effectuer de quatre façons différentes basées sur les actions:

1° Électro-magnétiques, du courant sur un aimant voisin ;

2° Électro-dynamiques du courant sur un autre;

3° Chimiques sur un liquide décomposable;

4° Calorifiques dans un conducteur traversé par le courant étudié.

Nous allons examiner successivement ces quatre manières d'opérer en insistant surtout sur les appareils de la première catégorie, que l'on nomme des *galvanomètres* d'une manière générale. Ces appareils se composent essentiellement d'un aimant et d'un circuit traversé par le courant.

On distingue deux sortes de galvanomètres suivant que l'une ou l'autre de ces deux pièces est mobile.

Principe d'un galvanomètre à aimant mobile. — Soit NS la direction de la méridienne et prenons une aiguille aimantée mobile dans un plan horizontal; abandonné à lui-même, cet aimant s'oriente suivant NS en prenant la position AB. Disposons autour de AB une bobine dont les spires parallèles entre elles aient toute la direction NS.

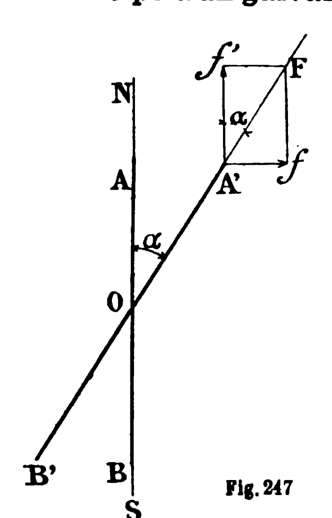


Fig. 247

Pendant le passage de l'électricité, l'aiguille est soumise à deux actions : celle de la terre et la force électro-magnétique.

La première tend à maintenir l'aiguille dans sa position initiale; elle a donc la direction NS. L'action du courant est normale à cette direction ; elle tend à mettre le barreau en croix avec les spires. Il résulte donc de ces deux actions simultanées, une déviation α (fig. 247) moindre que 90°, qui amène l'aimant en A' B'. Considérons les deux forces qui agissent sur le pôle A' ; elles sont f et f' ; nous allons les évaluer :

1° Soit G l'intensité, au point A', du champ produit par un courant unité (action sur le pôle unité). Pour un courant I cette intensité devient : $G \times I$ et l'action sur le pôle A', contenant une quantité de magnétisme égale à m, s'exprime par :

$$f = GIm$$

2° Soit $\mathcal{H}$ la composante horizontale du champ magnétique terrestre; c'est l'action sur un pôle unité; sur A', la force est :

$$f' = \mathcal{H}m$$

La résultante des deux forces s'obtient par la règle du parallélogramme; elle est dirigée suivant le prolongement de la position *d'équilibre* de l'aiguille. On peut donc écrire en considérant le triangle rectangle A' Ff'.

$$f = f' \operatorname{tg} \alpha$$

ou

$$GIm = \mathcal{H}m \operatorname{tg} \alpha$$

$$GI = \mathcal{H} \operatorname{tg} \alpha$$

et

(1) $$I = \frac{\mathcal{H}}{G} \operatorname{tg} \alpha$$

$\mathcal{H}$ est invariable pour toutes les positions que A' peut occuper, mais il n'en est pas de même de G en général.

Si le champ du courant est uniforme ($G =$ constante), on voit que

(2) $$I = K \operatorname{tg} \alpha$$

K étant une quantité invariable. L'intensité est donc proportionnelle à la tangente de la déviation.

Dans le cas où le champ est variable d'un point à l'autre, on ne peut poser la même relation mais cependant si on ne veut utiliser que de petites déviations, on est en droit de faire deux simplifications : 1° le point A' se déplace peu, donc G ne varie pas beaucoup; on néglige ses changements; 2° pour la même raison α est petit et on confond la tangente avec l'arc lui-même. On a ainsi

(3) $$I = K\alpha$$

L'intensité est *sensiblement* proportionnelle à la déviation (dans le cas de petits angles).

Boussole des tangentes. — C'est un appareil destiné à la *mesure absolue* d'une intensité et combiné de façon à assurer l'uniformité du champ dans toute la région où se meut l'aiguille. Pour cela on prend un cadre de grande dimension et on place, dans l'espace central, l'aimant qui est tout petit.

Nous avons alors rigoureusement

$$I = K \operatorname{tg} \alpha$$

K étant le quotient $\frac{\mathcal{H}}{G}$, comme on l'a vu ci-devant. Cette constante se calcule :

En effet $\mathcal{H}$ nous est connu et G peut s'évaluer : nous avons calculé l'action d'une spire circulaire de rayon a sur un pôle unité situé au centre (voir page 152) et nous avons obtenu $\frac{2\pi}{a}$. Pour une bobine entière il vient

$$G = \frac{2n\pi}{a}$$

n étant le nombre de spires. Nous avons donc en remplaçant G par sa valeur dans l'équation (1) établie précédemment

$$I = \frac{\mathcal{H}a}{2n\pi} \operatorname{tg} \alpha$$

Si l'on veut I en unités électro-magnétiques CGS, on a soin d'exprimer $\mathcal{H}$ en dynes et a en centimètres. Le nombre d'ampères se déduit de l'intensité I au moyen d'une multiplication par 10 (puisqu'un ampère $= \frac{1}{10}$ d'unité électro-magnétique).

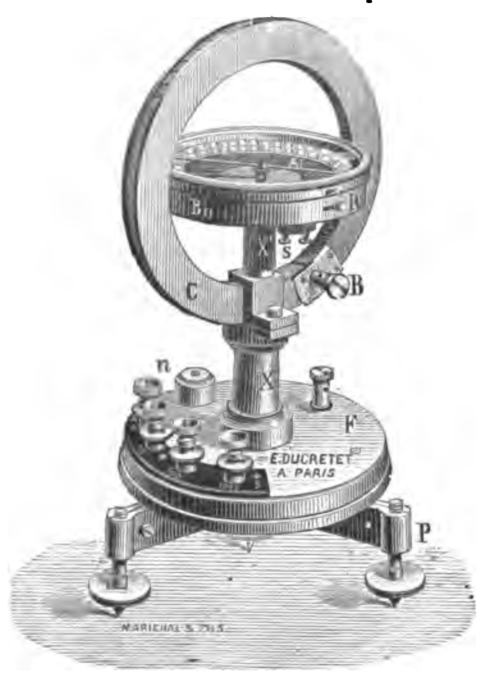


Fig. 248

Le barreau *très petit* entraîne avec lui un index long et léger qui marque ses déviations sur un cadran divisé. Le zéro de cette graduation coïncide avec le plan même de la bobine, et tout l'ensemble se déplace autour d'un axe vertical se confondant avec celui de l'aimant. Ce dernier se dirige de lui-même dans le méridien magnétique, et l'on tourne le système jusqu'à amener les spires dans ce même plan. (L'aiguille est alors au zéro).

L'appareil peut d'ailleurs être gradué directement : on fait passer le courant d'une source, pile ou accumulateur, à la fois dans la boussole et dans un voltamètre à eau acidulée. L'observation du voltamètre nous donne l'intensité I du courant qui correspond à une déviation déterminée. On en déduit immédiatement la constante K. Nous reviendrons plus loin sur cette même opération quand nous parlerons du tarage des galvanomètres en général.

Galvanomètres sensibles à aimant mobile. — La boussole des tangentes, en raison même de sa disposition, n'est pas sensible.

La formule trouvée précédemment

$$I = \frac{\mathcal{H}}{G} \operatorname{tg} \alpha$$

peut s'écrire encore

$$\operatorname{tg} \alpha = I \times \frac{G}{\mathcal{H}}$$

Donc, pour une intensité donnée I, si nous voulons augmenter α, il faut faire 1° croître G et 2° diminuer $\mathcal{H}$.

Pour faire croître G, nous devons évidemment resserrer le fil autour de l'aiguille.

On laisse au centre de la bobine une place juste suffisante aux mouvements du barreau. Quant à la forme extérieure de cette bobine, elle n'est pas non plus sans influence sur la sensibilité de l'instrument.

Les spires doivent être nombreuses, mais cependant il y a une limite car le volume de la bobine est ordinairement à peu près fixé et, si l'on veut beaucoup de tours de fils, on doit employer des conducteurs très fins. La résistance présentée à l'électricité entre alors en ligne de compte : si l'intensité à évaluer est relativement considérable, on a intérêt à prendre des bobines peu résistantes, comprenant un petit nombre de spires ; au contraire, quand on observe des courants ayant à traverser d'autre part des résistances énormes, le galvanomètre doit être à fil fin et long ;

2° On arrive à diminuer l'action directrice de la terre par deux méthodes différentes :

a) On fait usage d'aiguilles doubles, dites *astatiques*, parce qu'elles sont à peu près soustraites à la direction terrestre. Ces deux aimants ont sensiblement même aimantation ; on les dispose parallèlement l'un à l'autre, leurs pôles de nom contraire en regard, en ayant soin de les relier mécaniquement (fig. 249).

Le moindre courant, passant, autour *d'une des aiguilles* NS, suffit à faire dévier le système et l'on voit que l'action magnétique sur l'aiguille N'S' concorde avec celle qui s'exerce sur le barreau NS (règle d'Ampère).

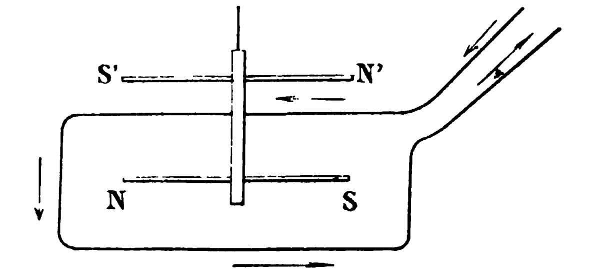
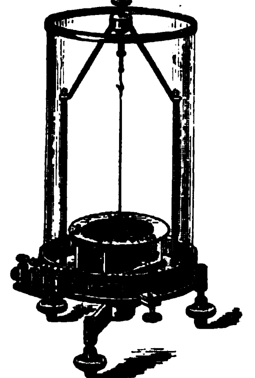


Fig. 249

Mais on doit seulement *diminuer* $\mathcal{H}$ et non *pas l'annuler ;* si l'on rendait $\mathcal{H}$ égal à zéro, la tangente α serait infinie pour le courant le plus faible et l'angle α lui-même vaudrait un droit. L'appareil cesserait d'être un galvanomètre ; ce serait un galvanoscope ou un *indicateur de courant*. C'est pourquoi on donne toujours à l'un des barreaux un petit excès de magnétisme.

La disposition indiquée est celle du galvanomètre de Nobili (fig. 250) ; l'ensemble des deux aimants est suspendu par un fil de cocon ; l'un se déplace sur un cadran ; l'autre est à l'intérieur de la bobine, qui est plate. Nous retrouverons du reste le système dans le galvanomètre Kelvin.


Fig. 250

Les aiguilles astatiques peuvent aussi être mises verticalement (système Weiss).

b) On diminue encore $\mathcal{H}$ au moyen des *champs correcteurs*. On nomme ainsi le champ créé par un aimant placé à proximité de l'aiguille mobile. Ce champ peut être en opposition de sens avec le champ

terrestre et l'on arrive même à égaliser les deux actions contraires par une position convenable du barreau correcteur. Alors la pièce mobile devient astatique et le plus faible courant la porte à 90 degrés du plan du cadre. Cette disposition n'est pas convenable pour faire une mesure, mais il est facile de déplacer très légèrement l'aimant correcteur en laissant ainsi au champ résultant une valeur aussi petite qu'on le veut.

Lecture des déviations. — Les galvanomètres très sensibles sont généralement employés pour des courants excessivement faibles, et alors la déviation de l'aiguille est petite. On doit l'amplifier, et on y arrive par la méthode optique : sur le fil de suspension est adapté un petit miroir concave mm_1 (fig. 251). Une source lumineuse très déliée et, au-dessous, une échelle graduée en millimètres MM' sont placées

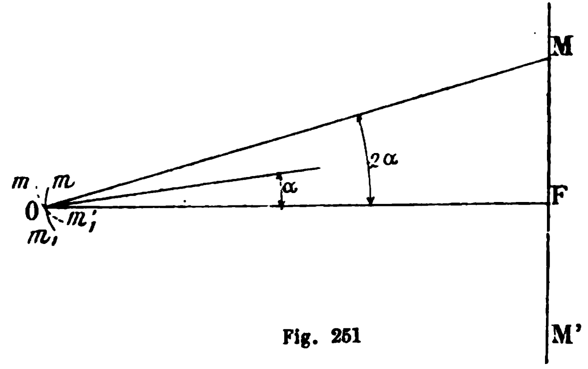


Fig. 251

dans un même plan vertical passant par le centre de courbure du miroir. Dans ces conditions, l'image réelle du trait lumineux, donnée par mm_1 vient se former sur l'échelle. Quand l'aiguille est au repos, la tache lumineuse doit coïncider avec le zéro de la règle. Quand l'aiguille se déplace d'un angle α, le rayon réfléchi tourne de 2α (1) et l'image va de F en M ; son déplacement FM est sensiblement proportionnel à 2α, c'est-à-dire à α. Mais α lui-même varie en raison directe de l'intensité I; donc, finalement, nous pouvons dire que

$$I = K \times \overline{MF}.$$

La règle divisée est quelquefois translucide, en verre dépoli ou en celluloïd; on regarde alors les écarts par transparence. Pour les observations personnelles, on se sert souvent d'une lunette fixée normalement à l'échelle; le miroir est plan dans ce cas et, quand il est au repos, l'œil aperçoit au centre du champ de la lunette, au point de croisement des réticules, le zéro de la graduation. Le déplacement de l'équipage mobile montre une autre division de la règle, de sorte que l'on peut lire ainsi des écarts proportionnels encore aux intensités mesurées.

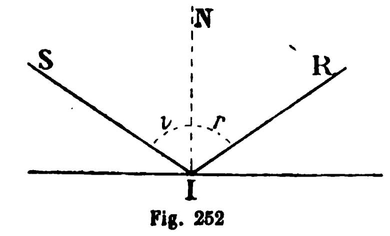


Fig. 252

1. En effet, l'angle du rayon incident et du rayon réfléchi est toujours égal au double de l'angle d'incidence car $i = r$; si le miroir tourne d'un certain angle α, i augmente de α, r croit d'une égale quantité et le rayon réfléchi tourne de 2α.

Amortissement des oscillations. — L'aiguille aimantée ne se fixe à sa position d'équilibre qu'après avoir exécuté de part et d'autre des oscillations plus ou moins nombreuses. Ce phénomène gêne les observations, mais on peut l'empêcher ou tout au moins l'atténuer de diverses façons : soit par un moyen mécanique, soit par un moyen électrique. Dans tous les cas, si le but est atteint, l'appareil est dit *apériodique*.

Pour y arriver, on munit l'équipage mobile d'une petite palette se déplaçant dans un liquide, glycérine par exemple, ou dans un volume restreint d'air.

La méthode électrique consiste à utiliser les courants induits dans un conducteur voisin de l'aimant. L'aiguille mobile est enfermée dans une cage métallique à parois épaisses (fig. 234); la loi de Lenz nous explique l'amortissement des oscillations : les courants induits par les déplacements du barreau s'opposent, en effet, à la continuation du mouvement.

Nous verrons qu'à ce point de vue, les galvanomètres à circuit mobile sont bien plus parfaits que ceux qui nous occupent en ce moment.

Emploi des shunts. — Le galvanomètre sensible, destiné à la mesure de courants très faibles, peut être utilisé pour l'étude des intensités plus fortes. Il suffit pour cela de munir l'instrument de dérivations mises entre les bornes et destinées à recevoir une grande partie du courant étudié; une fraction minime de l'électricité passe dans le fil galvanométrique et la déviation n'est pas exgérée; souvent, à un même appareil, se trouvent adjoints un certain nombre de *shunts* semblables.

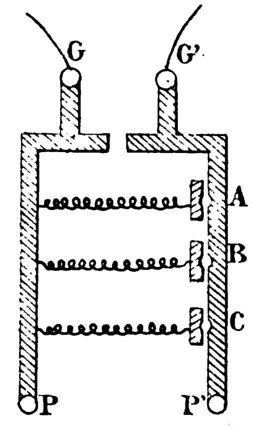


Fig. 253

Ces fils sont disposés comme le montre le schéma (fig. 253) : G et G' sont les bornes du galvanomètre; P et P' sont les extrémités du circuit; on peut en enfonçant une cheville en A, en B ou en C, faire usage de l'une quelconque des trois résistances figurées.

L'intensité observée, dans ce cas, n'est qu'une fraction $\frac{1}{m}$ de celle que l'on cherche; le facteur m s'appelle *pouvoir multiplicateur* du shunt.

Le problème a été déjà traité à propos des courants dérivés; si nous désignons par g et par s les résistances respectives de la bobine et de la dérivation, par i et i' les intensités dans ces deux fils, nous avons

$$\frac{i}{i'}=\frac{s}{g}$$

d'où

$$\frac{i}{i+i'}=\frac{s}{g+s}$$

mais $i+i'$ est l'intensité I du courant entier. Alors

$$\frac{i}{\mathrm{I}}=\frac{s}{g+s}$$

d'où

$$I = i \times \frac{g+s}{s}$$

La déviation du galvanomètre accuse une intensité i; nous voulons connaître I. Le pouvoir multiplicateur du shunt est donc

$$m = \frac{g+s}{s}$$

Souvent il y a trois branches au shunt : dans l'une, la résistance s est le $\frac{1}{9}$ de celle g du galvanomètre; dans la seconde, le rapport est $\frac{1}{99}$; dans la troisième $\frac{1}{999}$.

On a alors respectivement pour les pouvoirs de ces shunts :

$$m_1 = \frac{s_1 + 9\,s_1}{s_1} = 10$$

$$m_2 = \frac{s_2 + 99 s_2}{s_2} = 100$$

$$m_3 = \frac{s_3 + 999\,s_3}{s_3} = 1000.$$

Ainsi les indications obtenues doivent être multipliées par 10, par 100 ou par 1 000, suivant les cas.

Remarque. — L'emploi d'un shunt modifie la résistance présentée au courant. En effet, au galvanomètre, de résistance g, nous avons substitué un circuit complexe constitué par deux dérivations : l'appareil de mesure et le shunt. La résistance de l'ensemble est ρ (voir page 81) telle que :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{g} + \frac{1}{s}$$

$$= \frac{g+s}{gs}$$

Mais nous avons posé

$$\frac{g+s}{s} = m$$

donc

$$\frac{1}{\rho} = \frac{m}{g}$$

et

$$\rho = \frac{g}{m}$$

Si donc nous voulons maintenir constante la résistance du circuit, nous nous trouvons dans la nécessité d'introduire une *résistance de compensation* dont la valeur, pour un shunt donné, est

$$g - \frac{g}{m}$$

ou

$$g\,\frac{m-1}{m}$$

Quand on n'est pas d'avance fixé, au moins d'une façon approximative, sur la valeur du courant étudié, il est prudent d'employer d'abord le shunt le moins résistant pour réduire le plus possible l'intensité. Si la déviation est alors jugée trop faible, on met un autre réducteur à la place du premier.

Galvanomètre Wiedeman. — L'aimant mobile A a la forme d'un fer à cheval; le magnétisme se conserve mieux alors que dans un barreau rectiligne. Cet aimant est suspendu par un fil de cocon à un petit treuil S' qui permet de monter ou de descendre le système. Une enveloppe de cuivre A à parois épaisses, comme le montre la figure 254, assure l'apériodicité de l'instrument.

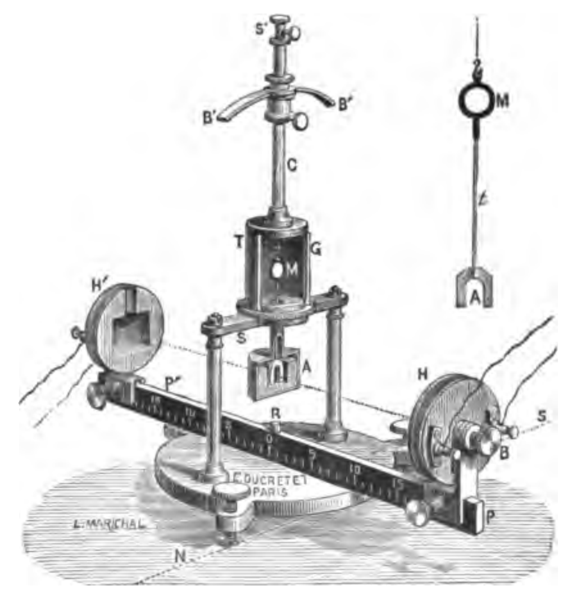


Fig. 254

La sensibilité est variable : on la modifie en déplaçant les deux bobines H et H', l'une par rapport à l'autre le long d'une règle graduée. On peut d'ailleurs employer des bobines à fil fin ou à fil gros suivant les circonstances. Un aimant correcteur BB', en forme d'arc, est mobile sur la colonne C qui contient le fil de suspension; il permet de diminuer, autant qu'on le veut, l'action directrice de la terre.

Galvanomètres Kelvin (W. Thomson). — Ces appareils sont à une ou à deux bobines. Le barreau unique des autres galvanomètres est remplacé par un système de plusieurs petites aiguilles parallèles. Le tout est porté par un fil de cocon ou un fil de quartz.

Prenons le cas du galvanomètre à deux bobines B*o* et B*o*'; il y a alors deux systèmes aimantés B et B' formés chacun d'un certain nombre de petits barreaux comme l'indique la figure 255 (détail). Les deux systèmes reliés entre eux sont de disposition inverse, ce qui rend l'ensemble astatique, mais un aimant correcteur BB', mobile, permet de donner à la partie magnétique une légère orientation.

Chaque groupe aimanté occupe la partie centrale d'une bobine ; quant au sens de l'électricité envoyée dans ces fils, inutile de dire qu'il est contraire dans les deux enroulements, ce qui rend concordantes les deux actions électro-magnétiques. D'ail-

leurs on voit sur la figure, quatre bornes occupant le premier plan; ce sont les extrémités des deux fils. Cette disposition permet d'employer aussi l'appareil comme *galvanomètre différentiel* : en effet, deux courants distincts, s'ils sont égaux, agissent également et chacun dans un sens si on renverse le parcours de l'électricité dans l'une des bobines. Alors l'aiguille reste immobile. Au contraire, l'inégalité des intensités se traduit par une déviation des barreaux dans un sens ou dans l'autre.

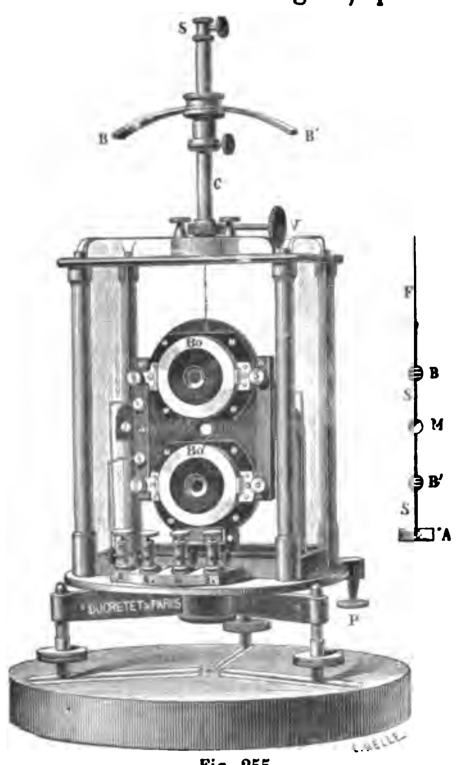


Fig. 255

On voit en A (fig. 255, détail) une petite palette destinée à servir d'*amortisseur*.

Principe des galvanomètres à circuit mobile. — Au lieu de faire agir un circuit fixe sur un aimant mobile, on peut rendre immobile le barreau et abandonner à lui-même le circuit électrique. Ce dernier tend à se placer perpendiculairement aux lignes de force du champ magnétique, mais si la suspension est métallique, elle exerce un couple antagoniste. Ce couple est sensiblement proportionnel à l'angle de déviation α (si on a eu soin de placer le plan du cadre dans la direction des lignes de force, en l'absence du courant), soit $c\alpha$ sa valeur; il fait équilibre au couple électro-magnétique que nous allons évaluer :

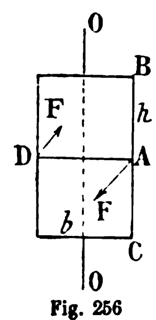


Fig. 256

Soit $\mathcal{H}$ l'intensité du champ créé par l'aimant, au point A; la force qui s'exerce sur le côté BC vertical du cadre, parcouru par le courant i, est donnée par la loi de Laplace généralisée (voir page 162); les lignes de force sont supposées horizontales et par suite perpendiculaires au côté BC (et dans le plan BCD). Alors l'angle $(\mathcal{H}, ds)$ est droit; son sinus vaut l'unité et la formule générale nous donne

$$\mathcal{H}i \times \overline{BC} \quad \text{ou} \quad \mathcal{H}ih$$

S'il y a n fils semblables superposés, la force F prend la valeur :

$$F = n\mathcal{H}ih$$

Elle agit normalement sur le cadre; le moment du couple de forces FF est donc:

$$F \times \overline{AD} \quad \text{ou} \quad F \times b$$

Sa valeur est par suite

$$n\mathcal{H}ihb \quad \text{ou} \quad n\mathcal{H}is$$

s étant la surface du cadre. Écrivons l'égalité des deux couples

$$n\mathcal{H}is = c\alpha$$

Nous en tirons

$$i = \frac{c}{n\,\mathcal{H}\,s} \times \alpha$$

L'intensité est donc encore proportionnelle à la déviation, si nous pouvons considérer le couple c et l'intensité du champ $\mathcal{H}$ comme invariables, conditions réalisées dans le cas de petits déplacements. On a alors

$$i = K\,\alpha$$

Galvanomètre Deprez et d'Arsonval. — Le champ est produit par un système d'aimants en fers à cheval disposés verticalement. Les extrémités N et S sont souvent munies de pièces polaires alésées de manière à laisser entre les deux parties un espace cylindrique (fig. 257). Entre les deux pôles se trouve disposé un tambour creux en fer destiné à diriger les lignes de force du champ. Ces lignes, en vertu de la disposition des pièces magnétiques, ont sensiblement pour direction les rayons de la base du cylindre.

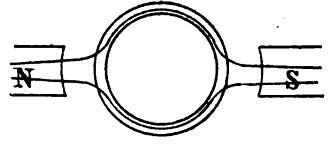
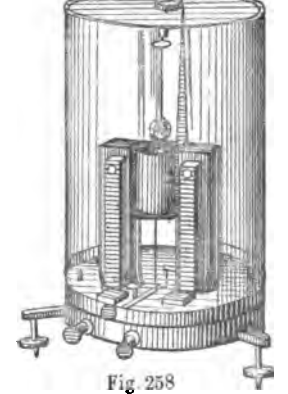
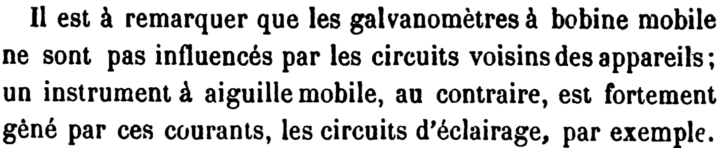


Fig. 257

Dans cet entrefer se place un cadre de forme rectangulaire formé par du fil maintenu dans du vernis à la gomme laque. Les extrémités de ce conducteur sortent de la bobine; elles servent à mettre le cadre en communication avec le circuit dans lequel on mesure l'intensité; le conducteur supérieur est fixé dans le haut à une pince mobile; au moyen de ce mouvement on arrive à placer le plan du cadre dans la position voulue quand le courant ne passe pas. On peut d'ailleurs, par une vis spéciale, élever tout l'équipage de manière à le rendre mobile. La même vis, tournée en sens inverse, fait reposer le système sur le tube central. Enfin, le fil inférieur, fixé à un ressort, permet de donner aux deux conducteurs une tension convenable.

Dans beaucoup de modèles, ces fils conducteurs de liaison sont droits (fig. 258); on peut les remplacer par des conducteurs enroulés en spirale; le ressort supérieur se tord quand le cadre se déplace; quant au fil inférieur, beaucoup plus long alors, il a uniquement pour but de conduire l'électricité. Mais dans le cas où l'on introduit cette modification, il faut suspendre la bobine plate par un fil sans torsion disposé suivant l'axe de la spirale supérieure.


Fig. 258


Il est à remarquer que les galvanomètres à bobine mobile ne sont pas influencés par les circuits voisins des appareils; un instrument à aiguille mobile, au contraire, est fortement gêné par ces courants, les circuits d'éclairage, par exemple.

L'amortissement des oscillations est parfait, dans cet appareil, si la bobine est fermée sur un conducteur de faible résistance (voir page 200). Entre deux expériences consécutives, on peut d'ailleurs amener immédiatement l'aiguille au zéro en disposant, entre les bornes du galvanomètre, une clef de court-circuit que l'on ferme au moment voulu.

Il peut être utile souvent de diminuer, pour un essai, la sensibilité de l'instrument; on y arrive aisément, en *armànt* l'aimant directeur, ce qui constitue un *shunt magnétique;* une pièce de fer doux quelconque, mise sur les deux pôles, remplit efficacement ce rôle.

Constantes des galvanomètres. — On définit la sensibilité d'un galvanomètre de différentes manières :

1° On peut indiquer la *déviation* (en millimètres, mesurée sur la règle divisée) *correspondant à un courant d'un microampère* $\left(\frac{1}{1.000.000} \textit{ d'ampère}\right)$. Cette constante est d'autant plus grande que le galvanomètre est plus sensible;

2° On prend encore l'*intensité du courant qui donne une déviation unité sur la règle.*

Nous avons écrit (voir page 250)

$$i = \mathrm{K}d$$

d étant l'écart de l'index lumineux observé sur la règle. Admettons que cette déviation soit l'unité ($d = 1$); l'intensité du courant prend alors une valeur déterminée i_1 telle que

$$i_1 = \mathrm{K}$$

Cette intensité correspondant à la déviation unité a donc pour valeur la constante K qui entre dans la formule du galvanomètre. C'est cette *constante de l'appareil* que nous adopterons de préférence;

3° On emploie encore sous le nom de *formule de mérite* du galvanomètre, la *résistance qu'il faut introduire dans le circuit d'un élément Daniell pour rendre la déviation, égale à l'unité* .

Détermination de la constante d'un galvanomètre. — On y parvient par deux méthodes principales :

1° *Au moyen d'un couple étalon.* — Comme nous le dirons plus loin, les deux principaux couples étalons sont l'élément *Latimer Clark* et l'élément *Daniell.* Le premier a une f. é. m. *parfaitement* déterminée à circuit ouvert, mais il se polarise facilement de sorte qu'on évite de le fermer sur une résistance moindre que 100.000 ohms; le couple Daniell est moins précis, mais il a l'avantage de ne pas se polariser aussi rapidement que le précédent. Nous supposerons, dans ce qui va suivre un élément Daniell monté suivant le modèle du *Post Office* (voir ci-après, étalons de f. é. m.). Sa force électromotrice est 1,09 volt, quantité constante pour un debit atteignant $\frac{1}{1.000}$ ampère.

Fermons le circuit de l'étalon P (fig. 259) sur une résistance R considérable et sur le galvanomètre G shunté par S. Il nous est facile de calculer, par la formule d'Ohm, l'intensité du courant obtenu. D'autre part, nous lisons la déviation sur la règle divisée. Le calcul de la constante est alors très facile à faire.

Supposons d'abord le galvanomètre shunté au $\frac{1}{m}$; sa résistance g est alors réduite à $\frac{g}{m}$; de sorte que la résistance totale du circuit s'exprime par

$$R + r + \frac{g}{m}$$

si nous désignons par r la résistance intérieure de l'élément.

L'intensité du courant obtenu est donc

$$I = \frac{1,09}{R + r + \frac{g}{m}}$$

et celle du courant qui circule dans le galvanomètre est

$$i = \frac{I}{m}$$

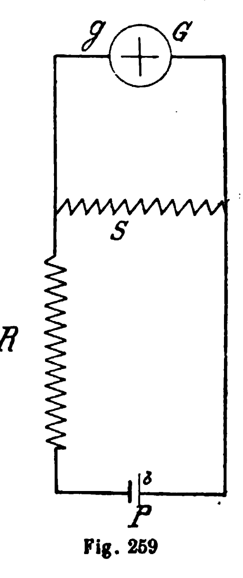


Fig. 259

Elle correspond à une déviation d, de sorte que l'on peut écrire

$$i = \frac{I}{m} = Kd$$

d'où

$$K = \frac{I}{md}$$

Remplaçons I par sa valeur ; il vient

$$K = \frac{1}{md} \times \frac{1,09}{R + r + \frac{g}{m}}$$

Nous ferons ensuite une seconde détermination semblable à la première en changeant de shunt et en remplaçant la résistance R par une autre convenable pour donner à la déviation une valeur suffisante. Nous devrons trouver une valeur de K sensiblement égale à la première ;

2° *Au moyen du voltamètre.* — Cette méthode est surtout employée dans le cas d'appareils shuntés de façon à mesurer des intensités de l'ordre d'un ampère.

On dispose sur un circuit une source convenable, quelques éléments d'accumulateurs par exemple, le galvanomètre shunté, un voltamètre et une résistance additionnelle (de quelques ohms) destinée à masquer les variations de résistance subies par le voltamètre pendant l'opération.

La déviation de l'index est mesurée à différents instants ; d'autre part, la quantité d'électrolyte décomposée donne, par un calcul facile à effectuer, l'intensité du courant obtenu. La constante K se détermine donc aisément.

Il s'agit d'installer un voltamètre pour évaluer l'action électrolytique. D'après la définition de l'ampère international, nous devons faire usage d'un voltamètre à argent. Cet appareil sera monté de la manière suivante, aux termes du *rapport du Congrès*, pour un courant d'intensité voisine de 1 ampère :

« La cathode sur laquelle ira se déposer l'argent sera formée d'une capsule de pla-
« tine ayant au moins 10 centimètres de diamètre et 4 à 5 centimètres de hauteur.

« L'anode sera une plaque d'argent pur ayant environ 30 centimètres carrés de
« surface et 2 à 3 millimètres d'épaisseur. Elle sera maintenue horizontalement dans
« le liquide, à peu de distance de la surface, par un fil d'argent rivé en son centre.
« Pour empêcher les fragments de métal qui s'en détachent de tomber sur la cathode,
« on enveloppera l'anode de papier filtre pur replié par derrière.

« Le liquide soumis à l'électrolyse consistera en une solution neutre de nitrate
« d'argent pur, contenant environ 15 parties en poids de nitrate pour 85 parties d'eau.

« La résistance du voltamètre changeant un peu pendant l'expérience, on préviendra
« les variations trop considérables que pourrait éprouver le courant, au moyen d'un
« rhéostat intercalé dans le circuit : la somme des résistances métalliques opposées au
« courant ne devra pas être inférieure à 10 ohms.

« *Manière de faire une mesure :* La capsule de platine est lavée successivement
« à l'acide nitrique, à l'eau distillée et à l'alcool absolu ; elle est séchée à 160° et laissée
« dans un appareil à dessiccation jusqu'à complet refroidissement. Elle est alors
« pesée exactement.

« On la remplit presque complètement de la dissolution et on la relie au reste du cir-
« cuit en la plaçant sur un support en cuivre bien propre et convenablement isolé.

« On plonge alors l'anode dans la solution jusqu'à ce qu'elle soit complètement im-
« mergée; on la fixe en place et on établit les connexions avec le reste du circuit.

« On ferme le contact à l'aide d'une clef, en notant le temps. On laisse passer le
« courant au moins une demi-heure. On note le temps au moment où l'on rompt le
« contact.

« On vide la capsule, on lave à l'eau distillée et on laisse tremper au moins six
« heures. On rince successivement à l'eau distillée, puis à l'alcool absolu et on sèche
« dans un bain d'air à 160° ; on laisse refroidir dans un appareil à dessiccation. On
« pèse de nouveau. Le gain accusé par la balance fait connaître la masse d'argent
« déposée.

« Pour avoir la moyenne du courant en ampères, on divise le nombre de grammes
« exprimant cette masse par le nombre de secondes pendant lequel le courant a
« passé et par 0,001118.

« Quand on détermine par cette méthode la constante d'un instrument, on doit
« maintenir le courant aussi uniforme que possible et noter les indications de l'instru-
« ment à intervalles de temps rapprochés. On pourra alors tracer une courbe qui
« fera connaître l'indication correspondant à la valeur moyenne du courant. »

Au lieu du voltamètre à argent, on emploie de préférence dans l'industrie le voltamètre à cuivre. Les électrodes sont en cuivre électrolytique : elles ont $\frac{1}{2}$ millimètre d'épaisseur environ et une étendue de 1 décimètre carré par ampère, à peu près. Ces lames soigneusement décapées aux acides nitrique et sulfurique sont rincées à l'eau

et à l'alcool puis séchées et pesées. On les dispose dans le liquide décomposable, solution de sulfate de cuivre pur, marquant de 1,10 à 1,15 au densimètre et additionnée de 5 % d'acide sulfurique.

Le courant est réglé au moyen d'un rhéostat et il est maintenu au moins une demi-heure.

La pesée finale des électrodes doit se faire avec les mêmes soins que l'opération initiale; le poids déposé, rapporté à la seconde et exprimé en grammes, est divisé par 0,0003307 et l'on obtient l'intensité en ampères.

Ampèremètres. — Les galvanomètres sont des instruments très précis mais ils nécessitent, de la part de ceux qui les emploient, une certaine habitude d'observation. Ils demandent souvent une orientation spéciale et de plus ne donnent jamais directement l'intensité en *ampères*. Il faut, en effet, si l'on veut utiliser l'instrument entre les limites qui permettent de considérer les déviations comme proportionnelles aux intensités, ne faire passer dans la bobine qu'une intensité très faible. On y arrive en faisant usage d'un shunt convenable, variable d'ailleurs avec le courant que l'on étudie, ce qui oblige à faire un calcul pour obtenir la valeur de l'intensité.

Dans certains cas, il est utile d'avoir des appareils plus robustes que les galvanomètres, plus faciles à employer et à consulter, portatifs et donnant l'intensité immédiatement par une simple lecture. On a alors des *ampèremètres*. En raison même de leur mode d'emploi, les ampèremètres doivent remplir plusieurs conditions et notamment présenter l'apériodicité; de plus, il faut que les appareils soient insensibles aux champs magnétiques extérieurs.

On distingue deux sortes d'ampèremètres qui répondent aux deux catégories de galvanomètres : dans les uns la pièce mobile est la partie magnétique; dans les autres c'est le circuit qui se déplace dans un champ fixe.

Nous prendrons comme types des ampèremètres de la première catégorie ceux de *Deprez*, de *Deprez et Carpentier* et d'*Evershed*. Les seconds seront représentés ici par les appareils *Chauvin et Arnoux* et *Weston*.

Quel que soit le système adopté, le courant à étudier doit passer dans la bobine de l'ampèremètre; on interrompt, par conséquent, le circuit pour placer l'appareil de mesure. La résistance de cette bobine étant faible, la production de chaleur est négligeable.

Sous l'influence du courant, la pièce mobile tourne et se fixe dans une situation déterminée d'autant plus éloignée de la position de repos que l'intensité mesurée est plus considérable. La valeur de cette intensité en ampères est indiquée en regard de la déviation obtenue.

Cette graduation, juste au début, cesse ordinairement de l'être après un certain temps de service car les pièces magnétiques, que l'on va indiquer dans chaque ampèremètre, se modifient à la longue, et il est bon de contrôler les indications de l'instrument à des intervalles de temps plus ou moins rapprochés.



Ampèremètre Deprez. — Dans tous les ampèremètres à aiguille mobile, on doit s'arranger de manière à soustraire la pièce déplaçable à l'action directrice terrestre. Sans cela il faudrait commencer par orienter l'ampèremètre. Or, l'instrument doit servir aussi bien fixé à un tableau vertical que posé sur une table. On remplace donc l'action de la terre par celle d'un aimant permanent qui accompagne l'instrument dans ses déplacements. Dans le modèle Deprez, l'aimant est en fer à cheval N S (fig. 260). Entre ses pôles se tient une pièce de fer doux *a* mobile, laquelle prend d'elle-même la direction des pôles N et S. Cette aiguille est entourée de deux bobines B et B' destinées à recevoir le courant. Dès que l'électricité passe, l'action électro-magnétique tend à dévier le fer à 90°; l'attraction magnétique, de son côté, agit pour conserver au barreau sa première position (fig. 261). Sous ces deux influences simultanées, la déviation de l'aiguille est moindre que 90° et un index l'amplifie. On lit immédiatement le nombre d'ampères sur le cadran.

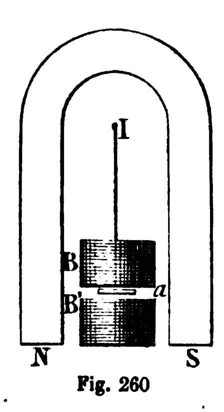


Fig. 260

Fig. 261

Ampèremètre Deprez et Carpentier. — Le champ est produit par deux aimants demi-circulaires A B, A' B' ayant en regard leurs pôles de même nom. Entre ces deux couples de pôles se tient une petite palette de fer doux. Jusqu'ici l'appareil ressemble bien au précédent; la différence réside dans la disposition des bobines (fig. 262). On remarque en effet, dans le modèle précédemment décrit, que le couple

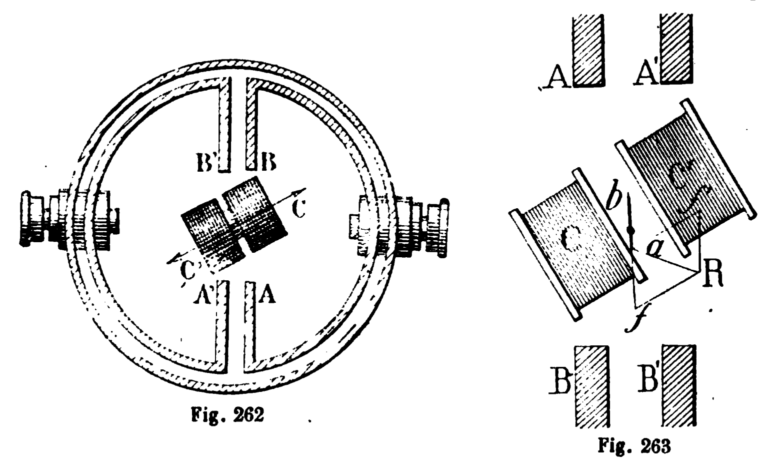


Fig. 262

Fig. 263

déviant tend à diminuer quand la déviation s'accentue car le bras de levier diminue (fig. 261) alors que le couple directeur augmente.

Il en résulte que les écarts varient peu si les intensités augmentent : les indications du cadran gradué sont très rapprochées les unes des autres. Pour éviter ce grave défaut, on incline les deux bobines par rapport à la ligne des pôles ; on voit (fig. 263) quelles sont alors les deux forces agissantes : action électro-magnétique *f'* et action

magnétique f; l'inclinaison des bobines et le sens de l'électricité sont tels que les deux actions font entre elles un angle obtus : les deux couples déviant et directeur augmentent en même temps, ce qui fait croître les écarts de l'index ; la graduation du cadran est alors plus régulière que dans l'appareil primitif.

Toutes les pièces sont logées dans une boîte métallique cylindrique et cachées par le cadran sur lequel se meut l'index léger qui fait corps avec l'aiguille.

L'emploi de cet ampèremètre suppose au courant un sens déterminé; la disposition est en effet dissymétrique et l'électricité doit toujours entrer dans la bobine par la même extrémité qui est à gauche de l'observateur regardant le cadran (pôle+).

Ampèremètre Evershed. — Cet ampèremètre n'a pas d'aimant permanent; à l'intérieur de la bobine qui reçoit le courant sont disposées deux pièces de fer doux A et B qui s'aimantent pendant le passage du courant. Suivant l'axe du solénoïde passe un petit arbre très mobile avec un index I à l'une de ses extrémités et supportant une palette de fer doux C et un petit contrepoids D (fig. 264). En l'absence du courant, les deux masses maintiennent l'aiguille au zéro. Mais si l'électricité est lancée dans le fil, l'aimantation des trois morceaux de fer a lieu et tous tendent à se placer dans une même direction ; il en résulte un soulèvement du contrepoids D et la déviation est d'autant plus grande que le courant est plus intense.

On peut, du reste, augmenter la sensibilité de l'instrument en déplaçant les pièces magnétiques A et B.

Un reproche adressé à ces instruments, est qu'ils sont fortement influencés par les champs voisins.

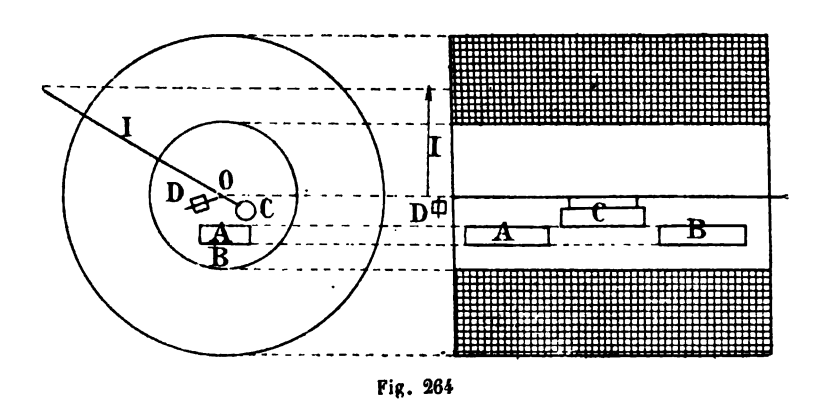


Fig. 264

Réducteurs. — Les instruments que l'on vient de décrire sont gradués en ampères de sorte qu'une lecture suffit à fixer l'intensité du courant qui traverse la bobine. Supposons un appareil dont l'échelle s'étend de 0 à 100 ampères ; nous pouvons, en le shuntant comme un galvanomètre, le faire servir à des mesures plus étendues. Les *dérivations* employées dans ce but portent le nom de *réducteurs*; chaque appareil peut en posséder plusieurs. Supposons à la dérivation r une résistance juste égale à

celle de la bobine g (fig. 265); le courant à mesurer I se bifurque en deux parties égales et l'on observe, dans l'instrument, une intensité moitié de celle que l'on cherche; il faut donc doubler les indications du cadran et l'ampèremètre peut servir ainsi de 0 à 200 ampères. Si le fil placé entre les bornes de l'appareil a une résistance égale à la moitié de celle du cadre, on ne reçoit qu'un tiers du courant dans la bobine galvanométrique et l'on doit tripler les chiffres observés; les mesures se font alors jusqu'à 300 ampères et ainsi de suite.

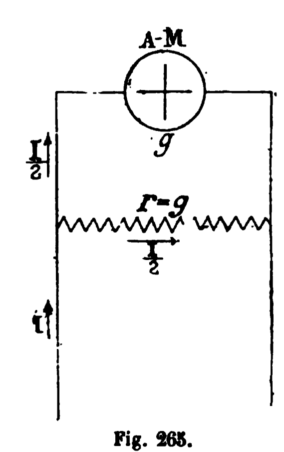


Fig. 265.

Ampèremètre Chauvin et Arnoux. — Il rentre dans la seconde catégorie d'instruments c'est-à-dire qu'il est formé d'un cadre galvanométrique mobile dans un champ magnétique. Nous avons donc à étudier successivement ces deux parties :

1° *Le champ magnétique*. Il est constitué par un aimant en forme de tore, en acier au tungstène *recuit* sans pièces polaires rapportées. Entre les extrémités alésées de cet aimant, se place une bille d'acier destinée à diminuer l'entrefer tout en laissant (comme dans le galvanomètre Deprez-d'Arsonval) l'espace nécessaire à la partie mobile (fig. 266).

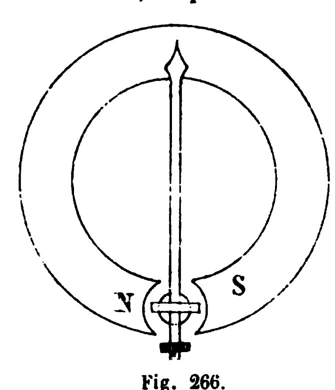


Fig. 266.

2° *Circuit mobile*. Un fil de cuivre, très fin, isolé à la soie et serti entre deux bagues concentriques en cuivre pur, le constitue. Ce support de métal assure à la fois la rigidité du cadre et l'amortissement des oscillations. Le mouvement a lieu autour d'un axe formé par deux pivots d'acier qui portent dans des crapaudines en pierre fine. Enfin deux ressorts spiraux établissent les communications électriques et exercent un couple qui est antagoniste du couple électro-magnétique. Une aiguille d'aluminium montée sur l'axe de la bobine marque ses déviations sur un cadre divisé. La résistance de la bobine est de 0,5 ohm. Ce cadre est tel qu'un courant de 0,05 ampère suffit pour déplacer l'aiguille d'une extrémité à l'autre du cadran. Il s'ensuit donc de là que l'ampèremètre Chauvin et Arnoux ne peut *directement* mesurer des courants supérieurs à cette limite, soit de $\frac{1}{20}$ ampère. Pour les intensités supérieures à cette valeur, il faut shunter l'instrument. Les shunts sont formés de bandes de maillechort soudées à deux blocs de cuivre munis de mâchoires destinées aux connexions. On introduit *directement* le *shunt* dans le circuit du courant inconnu et l'on met ensuite l'*ampèremètre en dérivation* sur le shunt; pour cela on a deux conducteurs souples terminés par des broches coniques qui s'engagent d'un côté dans les trous des blocs du shunt et d'autre part dans des ouvertures-bornes du galvanomètre (fig. 267). On peut ainsi réduire autant qu'on le veut la sensibilité de cet appareil de

mesure. Les shunts employés sont marqués en *ampères*; prenons par exemple le

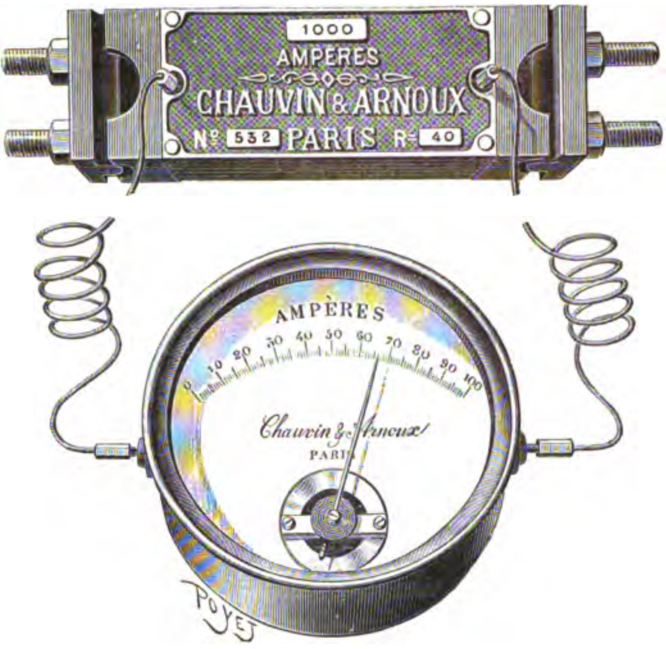


Fig. 267.

shunt de 1000 ampères (fig. 267); ce chiffre indique qu'un courant de 1000 ampères, traversant le circuit, communique à l'aiguille une déviation de toute l'échelle, soit le plus souvent de 100 divisions. Dans ce cas une division équivaut à 10 ampères et la figure accuse un courant de 660 ampères. Le chiffre $R = 40$, que l'on voit indiqué sur le shunt, est la résistance propre de cette pièce, exprimée en microhms. (Une bobine de maillechort, en série avec le cadre mobile et à l'intérieur de l'ampèremètre, a d'ailleurs été ajustée une fois pour toutes dans le tarage de l'instrument).

Si nous remplaçons le shunt de 1000 ampères par celui de 1, le cadran entier équivaut à 1 ampère et chaque division à $\frac{1}{100}$. On peut ainsi faire des mesures extrêmement étendues : de $\frac{1}{100}$ à 1000 ampères et davantage.

Une précaution indispensable est de choisir convenablement le shunt : sa valeur *en ampères* doit être au moins égale à l'intensité présumée du courant étudié. Si cette intensité cherchée est absolument inconnue, il faut commencer par le shunt le plus élevé que l'on remplace ensuite, s'il y a lieu, par un autre moindre.

Cet ampèremètre présente deux avantages considérables :

1° Ses indications ne dépendent pas du voisinage de courants même intenses. Cela a lieu en raison de la grandeur du champ propre de l'appareil.

2° Ce champ reste constant et l'étalonnage ne varie pas car l'intensité du courant

dans la bobine est très faible et l'action démagnétisante du cadre sur le champ est par suite réduite à son minimum de valeur.

Ampèremètre Weston. — Cet appareil est antérieur au précédent. C'est une modification du galvanomètre Deprez et d'Arsonval; il se compose d'un aimant disposé à plat sur la planchette qui sert de base à l'ampèremètre. Les extrémités de l'aimant N et S sont munies de pièces polaires étendues (fig. 268) présentant entre elles un espace cylindrique dans lequel se trouve le tambour de fer doux. Une bobine plate enroulée sur une carcasse d'aluminium se meut dans l'espace annulaire et l'action antagoniste de la force électro-magnétique est produite par deux ressorts spiraux en bronze phosphoreux. Cette partie mobile entraîne avec elle un index léger qui se meut sur une glace dans le but d'éviter les erreurs de parallaxe dans les lectures des déviations.

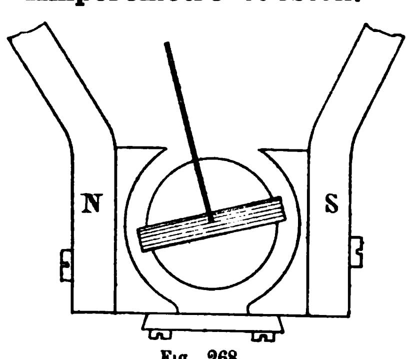


Fig. 268

Graduation et emploi des ampèremètres électro-magnétiques. — La graduation se fait ordinairement au moyen d'un galvanomètre étalonné. Nous avons vu précédemment comment on procède à cet étalonnage du galvanomètre ; la même opération peut se faire directement sur l'ampèremètre en employant soit le voltamètre à argent soit celui à cuivre. On peut encore faire passer le même courant à la fois dans l'ampèremètre et dans un appareil permettant de réaliser une mesure absolue d'intensité. Tel est le cas de la balance électro-dynamique de Thomson (voir page 267). Cette graduation une fois faite, l'instrument peut servir, sans étalonnage nouveau, pendant un temps plus ou moins considérable. En effet, il se produit toujours sur le champ magnétique directeur, une réaction provenant de la bobine galvanométrique elle-même. Si cette dernière est traversée par un courant très intense, la force magnétomotrice produite est grande, et cet effet souvent répété finit par modifier le flux de l'aimant permanent. Cette action démagnétisante est très faible dans les appareils du genre Chauvin et Arnoux, comme on l'a fait remarquer déjà. Il en résulte que les indications de ces instruments restent vraies beaucoup plus longtemps que celles d'autres ampèremètres.

Ces appareils se placent sur le circuit même dans lequel circule l'intensité inconnue. On doit donc ordinairement (après avoir arrêté le courant, s'il passait déjà), interrompre ce circuit et réunir les deux extrémités aux deux bornes de l'appareil de mesure en ayant soin de respecter la polarité. Les deux bornes sont ordinairement marquées des deux signes + et — ; la première est à gauche généralement, la seconde à droite. Nous avons vu que, dans la disposition Chauvin et Arnoux, les connexions sont un peu différentes.

Dans les installations électriques, l'ampèremètre est une des pièces principales du tableau de distribution.

Electro-dynamomètres. — On nomme ainsi, d'une manière générale, les instruments qui mesurent les intensités en se basant sur les actions mutuelles de deux circuits voisins.

Le premier a été construit par Weber; il est formé d'un cadre analogue à celui des galvanomètres, et fixe; une seconde bobine suspendue par un bifilaire est perpendiculaire à la première; les deux fils de la suspension servent à l'entrée et à la sortie du courant. Supposons que nous puissions négliger l'action directrice de la terre sur ce circuit mobile; nous y arriverons par diverses dispositions dont la plus simple, dans le cas qui nous occupe, est de diminuer le plus possible le nombre des spires. Faisons passer le courant à évaluer successivement dans les deux bobines; la partie mobile tend à tourner et à se placer à 90° de sa première position (de façon à mettre ses spires parallèles à celles de la bobine fixe). Mais la torsion du bifilaire s'oppose à la rotation complète et le déplacement s'arrête quand le couple de torsion égale le couple électro-dynamique. Nous allons donc évaluer ces deux couples :

Le premier est proportionnel à l'écart angulaire α; il vaut donc

$$C\alpha$$

Le second varie dans le même rapport que l'intensité dans *chacune* des bobines. Cette intensité vaut I, donc le couple électro-dynamique peut se représenter par

$$K I^2$$

Ecrivons donc

$$C\alpha = K I^2$$

Nous en tirons

$$I^2 = \frac{C}{K} \alpha$$

d'où

$$I = \sqrt{\frac{C}{k}} \sqrt{\alpha} = K \sqrt{\alpha}$$

k étant une nouvelle constante; on voit donc que *l'intensité est proportionnelle à la racine carrée de la déviation du cadre*.

On remarque que le signe de I, c'est-à-dire le *sens du courant* n'intervient pas. Nous verrons plus tard que l'instrument peut servir aussi bien pour les courants alternatifs que pour les courants continus.

Nous décrirons deux modèles d'électro-dynamomètres : ce sont deux appareils de *réduction à zéro*, c'est-à-dire qu'au lieu d'évaluer la déviation, nous annulerons ce déplacement soit par l'action d'un ressort antagoniste *(électro-dynamomètre Siemens)* soit par une véritable pesée *(électro-dynamomètre-balance de Kelvin)*.

Electro-dynamomètre Siemens. — Cet appareil peut servir à la mesure de courants intenses. La bobine fixe A comprend un certain nombre de spires, mais la partie mobile B est formée d'un seul tour de fil ; elle est suspendue par un fil de cocon et ses extrémités *a* et *b* plongent dans deux godets remplis de mercure qui servent à l'entrée et à la sortie du courant.

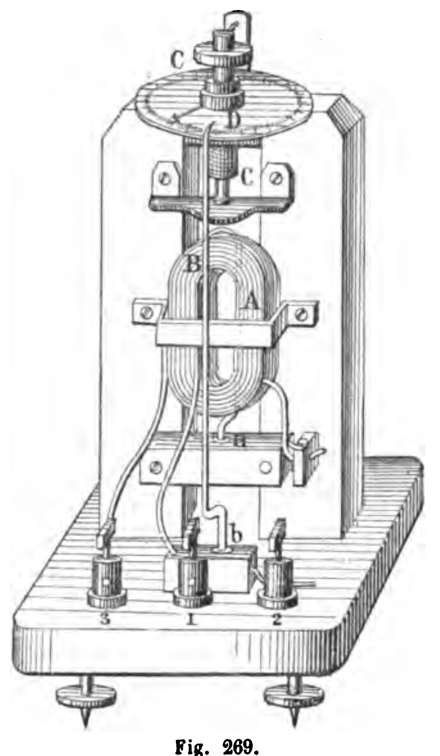


Fig. 269.

Une tige avec repère D marque sur un cadran divisé la position occupée par le système déplaçable.

Enfin ce système peut être entraîné par une tête de tension C agissant par l'intermédiaire d'un ressort à boudin.

En l'absence du courant, le cadre se tient dans une position déterminée marquée par le repère D. Lorsque le courant passe dans les deux bobines disposées en série, on voit le cadre B tourner d'un certain angle ; il faut alors, pour annuler cette déviation, agir sur la tête de torsion que l'on fait tourner d'un angle α. Cette torsion α fait équilibre au couple électro-dynamique et l'on peut écrire comme précédemment :

$$I = K \sqrt{\alpha}$$

K étant une constante,

Ordinairement l'appareil est muni d'une double bobine fixe ; l'une est à gros fil, l'autre à fil plus fin. Au moyen des trois bornes 1, 2, 3 placées sur le socle, on peut prendre à volonté, suivant les cas, l'un ou l'autre des deux circuits.

M. Carpentier construit un modèle d'électro-dynamomètre qui n'est qu'une modification du précédent ; il utilise le même procédé pour évaluer le couple électro-dynamique. Seulement les deux bobines ne sont pas montées en série ; elles sont placées en dérivation l'une par rapport à l'autre ; la bobine fixe est à fil gros, l'autre est à fil fin. Les extrémités de chacune aboutissent à deux paires de bornes qui se distinguent par leurs dimensions appropriées aux sections des deux fils. On fait communiquer ces bornes deux par deux puis le circuit est relié aux deux extrémités de ces fils dérivés. En raison des résistances très différentes des deux bobines, le courant passe à peu près en entier dans le circuit à gros fil ; soit I son intensité ; une faible dérivation i proportionnelle d'ailleurs à I, circule dans le fil fin. Le couple déviant est donc proportionnel à

$$Ii$$

ou bien à

$$I^2$$

Ecrivons sa valeur

$$K I^2$$

On équilibre ce couple par une torsion α du ressort qui correspond à un couple

$$C\alpha$$

donc encore

$$KI^2 = C\alpha$$

d'où

$$I = \sqrt{\frac{C}{K}}\sqrt{\alpha} = k\sqrt{\alpha}$$

formule identique à celle des électro-dynamomètres ordinaires.

Électro-dynamomètre-balance de Kelvin. — C'est un électro-dynamomètre double comprenant, aux deux extrémités d'un fléau de balance, deux bobines situées chacune entre deux solénoïdes fixes. Les actions électro-dynamiques doivent être concordantes sur les deux pièces mobiles de telle manière que l'extrémité gauche du

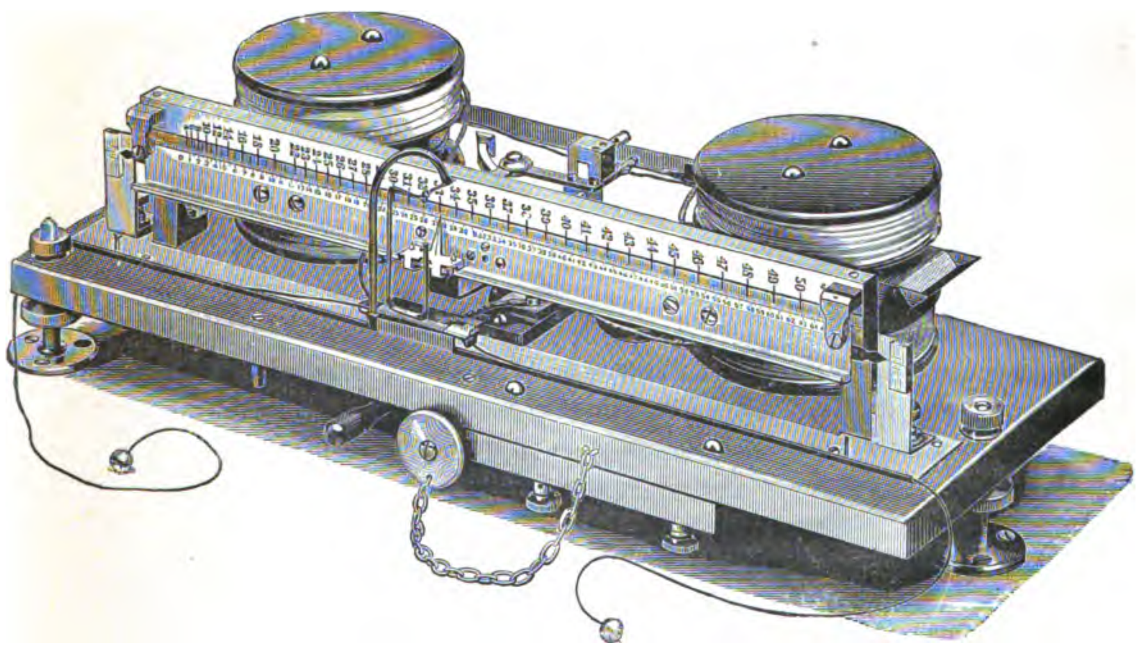


Fig. 270.

fléau soit attirée vers le bas tandis que l'extrémité droite est soulevée. Il s'agit alors de ramener à zéro la déviation du système : on y arrive par le déplacement d'un curseur pesant sur le bras mobile, absolument comme s'il s'agissait de faire une pesée au moyen de la romaine.

On voit (fig. 270) les quatre bobines fixes ; elles sont toutes quatre traversées par le même courant qui y circule de la même manière dans les deux supérieures et en

sens opposé au précédent dans les deux inférieures ; il suffit alors de donner aux deux bobines mobiles des enroulements opposés pour obtenir les actions concordantes ; on fait d'ailleurs passer dans ces bobines le courant principal, de sorte que les deux attractions sont proportionnelles au carré de l'intensité à évaluer I.

Il s'agit d'amener le courant à ces bobines suspendues ; lord Kelvin y est arrivé par l'emploi de deux séries de fils de cuivre nus et flexibles qui assurent en même temps la mobilité de tout le fléau.

L'équilibre du fléau étant rétabli par un déplacement d du curseur, nous pouvons écrire que I, toutes choses égales d'ailleurs, est proportionnel à la racine carrée du déplacement d. Posons

$$I = K \times 2\sqrt{d} \tag{1}$$

K étant une constante qui dépend de la valeur de la masse déplacée.

La grandeur d se lit sur la règle d'aluminium qui est entraînée par le fléau et sur laquelle se meut le curseur, petit chariot muni d'une pointe pour faciliter les lectures. Connaissant d et k, on a tout ce qu'il faut pour calculer I. Mais pour abréger les opérations, le constructeur a disposé une seconde règle en regard de la première ; elle est fixe et donne immédiatement la valeur de $2\sqrt{d}$. Ainsi l'on voit, sur la figure,

Règle mobile $d = 272$

— fixe $n = 2\sqrt{272} = 33$

nous pouvons donc poser

$$I = nK \tag{2}$$

mais remarquons : la lecture se fait beaucoup plus exactement sur la règle mobile ; cette dernière formule (2) n'est donc qu'une approximation.

Chaque appareil a une sensibilité variable : pour cela on modifie le poids du curseur en chargeant le chariot de masses additionnelles. Il faut donc connaître les valeurs de K relatives à chacun de ces poids.

Voici maintenant comment on emploie cet instrument :

Le curseur voulu est posé au zéro des échelles et le contrepoids correspondant est placé dans la gouttière spéciale que l'on voit à droite de la figure ; il s'agit de régler l'horizontalité du fléau en l'absence du courant. On a pour cela une masse pesante portée par l'équipage et mobile au moyen d'un levier qui apparaît vers le milieu du socle, près du bouton libérant le fléau. La position du système est repérée par deux index, l'un à droite, l'autre à gauche. On fait ensuite passer le courant, l'équilibre est détruit, et, pour le rétablir, il faut déplacer le chariot, par l'intermédiaire de deux cordelettes de soie. Dès que l'équilibre est rétabli, on lit n d'abord, ce qui donne une approximation, puis d, d'où l'on tire exactement I.



Il est construit cinq types de balances semblables :

Le modèle	centi-ampère	pour intensités de	1 à 100	centi-ampères
—	déci-ampère	—	1 à 100	déci-ampères
—	déca-ampère	—	1 à 100	ampères
—	hecto-ampère	—	6 à 600	—
—	kilo-ampère	—	25 à 2.500	—

Voici, à titre d'exemple, les données d'un type déci-ampère :

CURSEUR	Poids en grammes	K (en ampère)
Chariot seul	0, 8349	0, 025
— plus poids N° 1	3, 3515	0, 050
— — N° 2	13, 4060	0, 1
— — N° 3	53, 6240	0, 2

Mesure électrolytique de l'intensité. — Elle s'effectue au moyen d'un voltamètre. On peut adopter un électrolyte quelconque : eau acidulée, sel d'argent ou sel de cuivre. On sait que les quantités d'hydrogène, d'argent et de cuivre mises en liberté par un *coulomb*, c'est-à-dire par le courant d'intensité égale à un *ampère* durant *une seconde* sont :

Hydrogène.	0, 0104 milligramme
Argent	1, 1180 —
Cuivre	0, 3307 —

On mesure donc le poids dégagé dans un temps t et on rapporte ce poids à la seconde; il est alors facile d'établir l'intensité en ampères.

Quant aux précautions à prendre dans cette opération, elles ont été indiquées précédemment à propos du tarage des galvanomètres.

Mesure de l'intensité par les effets calorifiques du courant. — Nous savons, d'après la loi de Joule, que la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au carré de l'intensité du courant. Mais ordinairement ce n'est pas la quantité de chaleur qui est évaluée mais la dilatation résultant de l'échauffement.

Le système Cardew, le premier basé sur cette action, repose sur l'allongement d'un fil de platine-argent, d'une certaine longueur et tendu entre plusieurs poulies de porcelaine. L'accroissement de dimension est amplifié par un système de leviers commandant une aiguille mobile.

L'ampèremètre *Hartmann et Braun* est aujourd'hui très répandu, il est représenté

par la figure 271. La pièce dilatable est toujours un fil de platine-argent d'une longueur de 16 centimètres (on le voit en pointillé). Ce conducteur reçoit le courant étudié ou une dérivation connue, si l'on fait usage d'un shunt. Il est isolé électriquement du plateau qui le porte, lequel est formé de deux parties, laiton et fer, de manière à présenter le même coefficient de dilatation que le fil. Les variations de la température ambiante n'influent donc pas sur l'état de tension du conducteur. Du milieu de ce fil part un autre fil de laiton d'une longueur de 10 centimètres et dont la seconde extrémité est fixe. Enfin, au milieu du laiton est fixé un fil de soie qui s'enroule sur un renvoi et vient s'attacher à un ressort métallique. Ce dernier maintient donc constamment tous les fils tendus. L'axe de la poulie porte une aiguille mobile sur le cadran.



Fig. 271.

En l'absence de courant, les deux fils métalliques sont rectilignes et l'aiguille est au zéro de la graduation. Dès que l'électricité passe dans l'ampèremètre, l'alliage s'allonge et se courbe sous l'action du ressort, par l'intermédiaire du laiton. Il en résulte donc une rotation de la poulie et de l'aiguille. Quant à la graduation elle se fait empiriquement par comparaison avec un appareil étalonné.

L'apériodicité est obtenue par un disque d'aluminium entraîné par l'aiguille entre les pôles d'un aimant permanent.

Il est bien évident qu'un tel instrument est absolument à l'abri des actions électromagnétiques extérieures. Nous verrons plus loin qu'il peut indifféremment servir pour les courants continus et pour les courants alternatifs [1].

(1) Nous n'avons mesuré que les courants continus et il en sera de même dans toute cette partie des *Mesures électriques*. Nous ferons l'étude de la mesure des courants alternatifs dans un chapitre spécial, quand nous aurons défini d'une manière précise les constantes de ces courants.

CHAPITRE III

MESURE DES QUANTITÉS D'ÉLECTRICITÉ

L'unité de quantité est le *coulomb;* mais on a pris l'habitude d'employer souvent l'*ampère-heure*. C'est, comme nous l'avons vu, la somme d'électricité nécessaire à la production du courant d'un ampère pendant une heure, soit 3.600 coulombs.

Les appareils qui servent à cette mesure se nomment des *coulomb-mètres* ou des *ampère-heure-mètres*. On les appelle encore tout simplement *compteurs de quantité*.

On les divise en plusieurs classes : les uns sont de simples voltamètres convenablement disposés, d'autres reposent sur des actions mécaniques ; un dernier groupe est constitué par les ampèremètres enregistreurs.

Nous avons déjà indiqué le mode d'emploi des voltamètres (voir p. 257). Nous ne décrirons que l'appareil d'Edison, dont l'emploi est à peu près continu.

Compteur Edison. — Il consiste en un double voltamètre à sulfate de zinc, avec électrodes de zinc; chacun sert à son tour : il est dérivé sur une bande métallique peu résistante dans laquelle passe la majeure partie du courant à évaluer.

On fait en sorte ordinairement que le millième seulement du courant traverse le voltamètre et on a soin de maintenir constante la résistance du liquide en mettant en série avec l'instrument un fil de cuivre dont la résistance croît avec la température, tandis que celle du bain diminue dans le même cas.

Enfin, une lampe à incandescence, placée sous les voltamètres, s'allume automatiquement quand la température descend au-dessous d'une certaine valeur. Le liquide ne peut donc pas se congeler.

Dans les stations qui emploient ce compteur, un agent remplace chaque mois un voltamètre par l'autre et, à l'usine, on pèse la cathode pour en déduire la quantité d'électricité consommée (on doit multiplier par 1.000 le résultat donné par la pesée).

Cet appareil est assez exact, mais le consommateur ne sait pas quelle est sa dépense d'électricité. On lui préfère ordinairement les compteurs à cadrans qui renseignent immédiatement sur la consommation de l'abonné.

Compteur Aron. — Son principe réside dans la différence des oscillations de deux pendules de même longueur : l'un ordinaire, l'autre portant, en guise de masse pesante, un aimant permanent et oscillant au-dessus d'une bobine traversée par le

courant consommé. Si le sens de l'électricité, dans cette bobine, est tel que l'action électro-magnétique sollicite le barreau vers le bas, la force pesanteur est renforcée et les oscillations du second pendule sont plus rapides : ce balancier avance quand le courant circule dans le cadre; la différence des nombres de battements est proportionnelle à la quantité consommée. Un train d'engrenages différentiels enregistre, sur des cadrans semblables à ceux des compteurs à gaz, la consommation de l'électricité.

Cet appareil donne de bonnes indications, mais il se prête à la fraude; il suffit, pour empêcher l'enregistrement de la différence, de disposer convenablement un aimant directeur agissant en sens contraire de l'action du courant.

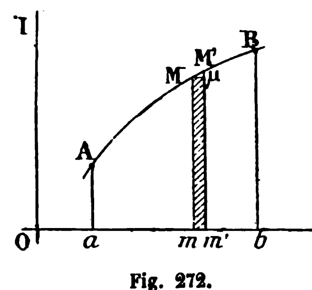


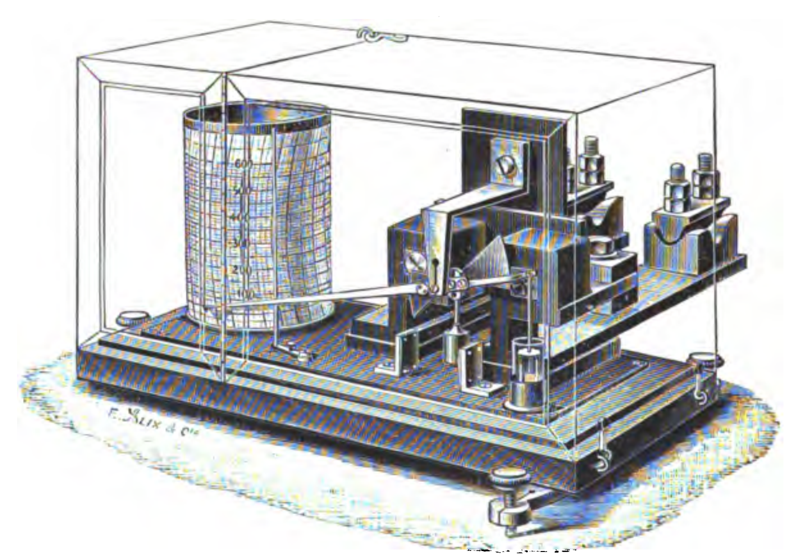
Fig. 272.

Ampèremètres enregistreurs. — Imaginons un ampèremètre dont la partie mobile porte un stylet marquant ses positions sur un papier qui se déroule d'un mouvement uniforme. Nous aurons sur ce papier les valeurs de l'intensité à chaque instant, c'est-à-dire une courbe :

$$I = f(t)$$

t représentant le temps. Soit AB une portion limitée de cette courbe (fig. 272). A une époque $0m = t$, l'intensité est Mm; cette intensité varie très peu (de M'μ seulement) pendant l'intervalle mm'. Il s'ensuit donc que la quantité d'électricité débitée pendant cette courte période est sensiblement :

$$\overline{Mm} \times \overline{mm'}$$


Fig. 273.

Elle est approximativement représentée par l'aire du trapèze curviligne Mmm'M'. Il en est de même à chaque instant, de sorte que la quantité totale d'électricité qui a passé dans l'ampèremètre pendant le temps de l'inscription AB est donnée par l'aire de ABba. Cette surface s'évalue, soit au planimètre, soit par une pesée du papier découpé suivant le contour de la surface.

Tous les ampèremètres pourraient servir à cet usage. La figure 273 représente le modèle Richard.

Mesure d'une décharge instantanée. — Galvanomètre balistique. — Le voltamètre et les compteurs de quantité permettent de mesurer la quantité d'électricité débitée par un courant continu, constant ou non. Ces appareils ne peuvent être employés quand il s'agit du courant instantané produit par la décharge d'un condensateur ou encore par l'induction dans la plupart des cas. Il est possible alors de déterminer la charge électrique d'après l'*impulsion* première reçue par le galvanomètre dans des conditions spéciales : on a alors un *galvanomètre balistique*.



Fig. 274.

Considérons un appareil du genre Deprez et d'Arsonval, mais modifié de façon à donner au système mobile un grand moment d'inertie et de manière à annuler l'amortissement (fig. 274).

Déchargeons à travers le cadre un condensateur dont les armatures ont été tout d'abord reliées à deux points présentant une différence de potentiel; nous voyons *au bout d'un instant* plus ou moins long (en raison de la grande valeur du moment d'inertie) la partie mobile se déplacer, atteindre un écart maximum puis revenir vers sa position d'équilibre et dépasser enfin cette position, pour continuer à exécuter des oscillations d'amplitude décroissante.

Les lois de la mécanique appliquées à ce mouvement conduisent à deux résultats principaux :

1° Toutes les oscillations sont isochrones;

2° Leurs amplitudes décroissent en progression géométrique. Si l'on appelle α_{n-1} l'amplitude de celle d'ordre $n - 1$ et α_n, l'écart du système lors de la n^e, T la durée d'une oscillation simple, on a

$$\frac{\alpha_n}{\alpha_{n-1}} = e^{-a}$$

a étant une constante.

On écrit ordinairement

$$a\mathrm{T} = \lambda$$

Alors

$$e^{a\mathrm{T}} = e^{\lambda}$$

d'où la valeur de λ

$$\lambda = \log_e e^{a\mathrm{T}} = \log_e \frac{\alpha_{n-1}}{\alpha_n}$$

Cette grandeur λ reçoit le nom de *décrément logarithmique* des oscillations. L'expérience vérifie ces résultats : on détermine aisément, au moyen d'un chrono-

mètre, la durée des oscillations à divers instants. On la trouve constante. (On a soin de compter la période à partir de la position la plus écartée de l'origine, car alors la vitesse de déplacement passe par zéro et on saisit facilement l'instant précis du passage).

Pour vérifier le second résultat, on détermine les élongations successives produites toujours par la décharge d'un condensateur dans le galvanomètre balistique et on fait le rapport de deux écarts consécutifs; les quotients sont identiques. Leur logarithme népérien donne le *décrément*.

Si l'on peut négliger l'amortissement, le calcul montre encore que la première élongation α_1 du cadre est proportionnelle à la quantité d'électricité q lancée dans l'appareil (en admettant la durée de la décharge assez petite pour qu'à la fin de ce temps le cadre soit encore au repos). Nous pouvons par conséquent écrire, en appelant K une constante

$$q = K\alpha_1$$

La sensibilité de l'instrument est alors d'autant plus grande que K est plus petit; (elle est proportionnelle à la durée de l'oscillation et en raison inverse du moment d'inertie).

Cet instrument donne le moyen d'évaluer cette quantité d'électricité q de la décharge instantanée. Admettons pour le moment, que nous connaissions K; il s'agit de déterminer α_1, valeur exacte de la première élongation; le chiffre α_1 que nous lisons est forcément un peu trop petit (car l'amortissement se fait toujours sentir), et nous devons l'augmenter d'une quantité convenable; pour trouver ce terme additionnel, nous admettrons que la décroissance des oscillations se fait en progression arithmétique (ce qui est sensiblement vrai pour un amortissement très faible). Alors nous lirons :

La première élongation α_1.

La troisième α_3, c'est-à-dire celle qui succède à α_1 du même côté du zéro.

Entre les deux lectures, nous avons quatre demi-oscillations simples; or l'élongation a diminué de :

$$\alpha_1 - \alpha_3$$

L'amortissement rapporté à l'intervalle *zéro* $- \alpha_1$ est donc

$$\frac{\alpha_1 - \alpha_3}{4}$$

et la première élongation corrigée a pour valeur

$$\alpha_1 + \frac{\alpha_1 - \alpha_3}{4}$$

On a donc

$$q = K\left(\alpha_1 + \frac{\alpha_1 - \alpha_3}{4}\right)$$

Il s'agit ensuite de connaître K. On le détermine par l'expérience : un condensateur étalon, de 1 microfarad par exemple, est chargé au moyen d'une différence de potentiel connue. On a donc la quantité q' d'électricité qui occupe le condensateur. Cette quantité est déchargée dans un galvanomètre balistique et l'on note une élongation corrigée α'. On peut écrire

$$q' = K\alpha'$$

d'où l'on tire

$$K = \frac{q'}{\alpha'}$$

CHAPITRE IV

MESURE DES DIFFÉRENCES DE POTENTIEL

On pourrait employer deux sortes de mesures : des méthodes directes et des méthodes indirectes. Mais ces dernières sont rarement en usage et le plus souvent on se contente de comparer la différence de potentiel inconnue à celle qui existe entre les pôles d'un couple étalon. Nous avons donc d'abord à nous munir d'étalons.

Étalon Latimer-Clark. — Pour nous conformer aux indications du Congrès international de 1893, nous devons adopter le Latimer-Clark.

Cet élément se compose de zinc ou d'amalgame de zinc, de mercure et d'une solution saturée neutre de sulfate de zinc et de sulfate mercureux dans l'eau, avec excès de sulfate mercureux.

On prend du mercure pur, redistillé dans le vide, du zinc également pur et redistillé, bien lavé et séché.

Le sulfate mercureux, additionné d'un peu de mercure, est lavé plusieurs fois à l'eau.

On forme, d'autre part, une dissolution de sulfate de zinc pur en mettant dans un flacon des proportions :

Eau	100
Sulfate de zinc.	200
Oxyde de zinc	4

Ce dernier est destiné à neutraliser tout acide libre.

On dissout à une douce chaleur, 30 degrés environ, et on ajoute 25 grammes de sulfate de mercure pour neutraliser l'oxyde de zinc restant libre. Ensuite on filtre à chaud et on conserve dans une bouteille.

Il s'agit de former une pâte de sulfate mercureux et de sulfate de zinc : on mêle le premier sulfate avec la solution du second, en ajoutant des cristaux de sel de zinc pris dans la bouteille où s'est fait le refroidissement, et un peu de mercure. On remue le tout pour en faire une pâte de la consistance de la crème et on chauffe vers 30 degrés, en agitant de temps en temps ; on agite encore pendant le refroidissement, et si l'opération est réussie, on voit apparaître, dans toute la masse, des cristaux de sulfate de zinc. Sinon on doit recommencer, mais en ayant soin de mettre une dose plus grande de sulfate de zinc solide.

Voici maintenant les prescriptions rappelées par la Commission des Unités électriques (mars 1896) :

« L'élément peut être convenablement monté dans un petit « tube à essai d'environ 2 centimètres de diamètre et 4 à 5 cen- « timètres de profondeur (fig. 275). Placer le mercure au fond « du tube, dont il remplira 0,5 centimètre. Prendre dans un « bouchon entrant exactement dans le tube, un morceau de « 0,5 centimètre ; y percer l'un à côté de l'autre deux trous « dans l'un desquels la baguette de zinc puisse passer très juste ; « le deuxième recevra un tube de verre recouvrant le fil de « platine dont il sera parlé plus loin ; y faire latéralement une « entaille pour la sortie de l'air quand on poussera le bouchon « dans le tube. Laver le bouchon à l'eau chaude et le laisser « tremper plusieurs heures. Enfoncer la baguette de zinc dans « son trou, de façon qu'elle face saillie d'environ un centimètre.

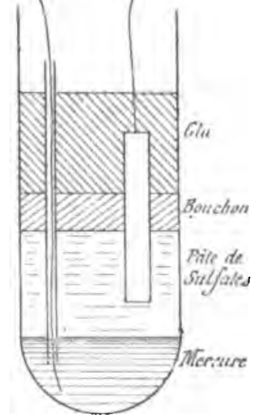


Fig. 275.

« Le contact avec le mercure est constitué par un fil de platine de 0,8 millimètre « de diamètre. Il est protégé du contact avec les autres substances de la pile par un « tube en verre qui l'entoure sur toute sa longueur, sauf à ses extrémités.

« Le fil et le tube ont été nettoyés avec soin.

« Prendre la pâte de sulfate et la verser dans le tube à essai en évitant de salir la « paroi supérieure, de façon à former au-dessus du mercure une couche de plus d'un « centimètre.

« Introduire ensuite le bouchon avec la baguette de zinc, en faisant passer le tube « de verre dans le trou ménagé à cet effet. Pousser doucement le bouchon jusqu'à ce « que sa surface vienne toucher le liquide.

« De cette façon, l'air sera complètement chassé et l'élément devra rester ainsi au « moins 24 heures avant d'être scellé, ce qui pourra être fait de la manière suivante :

« Chauffer de la glu marine jusqu'à ce qu'elle devienne assez fluide pour couler par « son propre poids, la verser dans le tube sur le bouchon en quantité suffisante pour « couvrir complètement le zinc et former de ce côté une soudure parfaite, d'où sort « seulement un fil de cuivre fixé au zinc. Le tube de verre renfermant le fil de platine « doit dépasser un peu la surface de la glu.

« On peut sceller l'élément d'une façon plus définitive en recouvrant la glu marine « quand elle s'est refroidie, d'une solution de silicate de soude qu'on laisse solidifier.

« Dans l'emploi de l'élément, il faut éviter autant que possible les variations brusques « de la température.

« La forme du vase contenant l'élément peut être variée. Dans la forme en H, le « zinc est remplacé par un amalgame de 10 parties en poids de zinc et 90 de mercure. « Les autres matériaux sont préparés comme il a été dit. Les contacts sont établis, « avec l'amalgame dans l'une des branches, avec le mercure dans l'autre, par des fils « de platine scellés dans le verre. »

La force électromotrice de cet élément est de 1,434 volt à 15 degrés. Elle varie avec la température et peut s'exprimer aux environs de 15° par la formule :

$$E = 1{,}434 - (t - 15)\ 0{,}001$$

A 15° le volt international vaut donc :

0,6974 Latimer Clark

Cet étalon ne doit jamais être fermé sur une résistance qui n'est pas considérable : 10.000 ohms est un chiffre minimum.

Etalon du Post-Office. — Il consiste en une pile Daniell de disposition spéciale. Sa force électromotrice n'est peut-être pas aussi bien déterminée que celle du Latimer-Clark mais cet étalon a l'avantage d'avoir un très faible coefficient de température ; de plus il peut débiter un courant appréciable $\left(\frac{1}{1000}\text{ ampère}\right)$ sans polarisation bien sensible.

Cette pile comprend un vase extérieur recevant le sulfate de zinc et un crayon de zinc amalgamé. Dans ce liquide plonge un vase poreux contenant du sulfate de cuivre et une lame de cuivre fraîchement recouverte d'un dépôt électrolytique du même métal.

La densité des solutions influe beaucoup sur la valeur de la force électromotrice. En adoptant les suivantes :

Sulfate de cuivre	$d = 1{,}1$	15°
— de zinc.	$= 1{,}4$	—

on a une force électromotrice égale à 1,07 à 1/2 °/₀ près.

L'étalon du Post-Office comporte, en outre des pièces décrites, un vase rempli de la solution cuivrique et un autre avec de l'eau. Dans le premier on place le vase poreux (plein du même sel) quand la pile ne doit pas fonctionner, et dans le deuxième est mis le crayon de zinc.

Autres étalons. — Un modèle assez employé est celui de M. Gouy : du mercure occupe le fond du vase, il est mis en communication avec l'extérieur au moyen d'un fil de platine isolé. Au-dessus du mercure est une solution de sulfate de zinc à la densité de 1,06 baignant un crayon de zinc amalgamé. On a :

$$E = 1{,}383 \text{ volt}$$

L'étalon *au cadmium* ne diffère de l'élément Clark que par la substitution de cadmium au zinc ; il se compose de cadmium, de sulfate de cadmium, de mercure et de sulfate mercureux. A la température de 20° centigrades, sa force électromotrice est :

$$e = 1{,}019 \text{ volt}$$

La variation de température ne l'affecte pas d'ailleurs d'une façon sensible.

Méthodes de mesure des différences de potentiel. — Nous distinguerons plusieurs moyens :

1° Les *méthodes électrostatiques* qui utilisent les actions mécaniques exercées entre deux corps électrisés maintenus à une certaine distance. Les appareils utilisant ces moyens portent le nom général d'*électromètres*.

2° La méthode du *condensateur* qui consiste à chercher la quantité d'électricité que prend, sous la différence de potentiel inconnue, un condensateur de capacité connue.

3° Les *moyens électro-magnétiques;* ils consistent à utiliser des galvanomètres convenablement disposés : *galvanomètres gradués en volts, voltmètres*. On mettra dans ce groupe les procédés *de compensation* et la *méthode absolue* qui détermine l'intensité du courant débité, dans une résistance donnée, par la source dont on recherche la f-é-m.

Electromètres. — Lord Kelvin a imaginé un *électromètre absolu;* il s'agit de mesurer, par une balance précise, l'attraction exercée entre deux plateaux chargés d'électricités contraires. Cette force est en effet intimement liée à la différence des potentiels et l'on fait ainsi une mesure absolue.

Le plus souvent on se contente d'opérer par comparaison et l'on a imaginé pour cela les électromètres à quadrants.

Dans un modèle très répandu, les quadrants sont doubles ou plutôt ils sont obtenus par la section en quatre parties égales d'une boite métallique de forme cylindrique très plate. Les coins sont arrondis pour éviter la déperdition des charges (fig. 276) et on relie, par

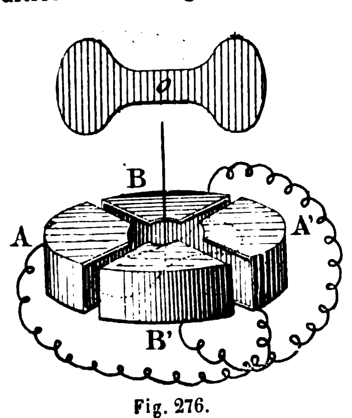


Fig. 276.

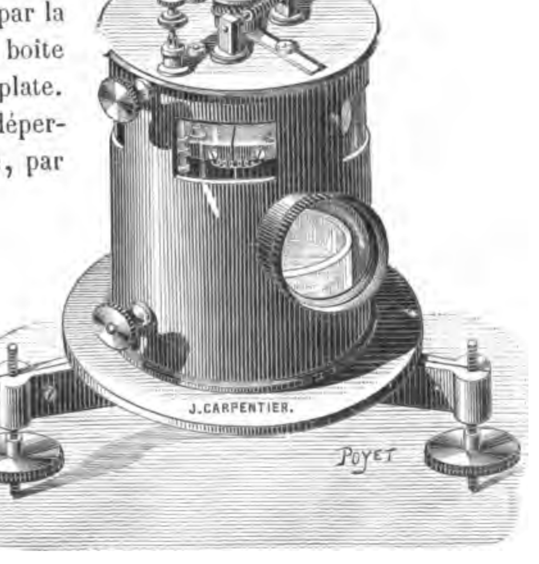


Fig. 277.

des fils conducteurs, les parties opposées par le sommet. Dans cette sorte de boite est

suspendue une palette légère, en aluminium ordinairement, dont le contour a la forme d'un 8.

La suspension est en soie et bifilaire ; elle isole l'aiguille, mais la communication de ce corps avec les objets extérieurs est assurée par un fil de platine disposé sous la palette et plongeant dans un vase rempli d'acide sulfurique; ce liquide amortit les oscillations du système en même temps qu'il dessèche l'air de la cage. Sur le fil de platine est fixé un miroir pour l'observation des déviations.

Chaque paire de quadrants communique avec une borne extérieure (fig. 277).

Appelons V et V' les potentiels de chaque groupe et v celui de l'aiguille. Cette aiguille est sollicitée vers chaque paire par une force qui est proportionnelle au carré de la différence de potentiel qui existe entre les deux pièces agissantes. Nous avons donc de la part des premiers secteurs, une force

$$K (v - V)^2$$

et de la part des seconds

$$K (v - V')^2$$

La différence des deux est donc

$$K [(v - V)^2 - (v - V')^2]$$

ou

$$K (V' - V) (2 v - V - V')$$

Le moment de cette force résultante est égal, en valeur absolue, à celui de la torsion soit $C\alpha$, si α est la déviation de l'aiguille.

On a donc

$$C\alpha = K (V' - V) (2 v - V - V') \quad (1)$$

Il y a plusieurs façons d'utiliser l'électromètre à quadrants :

1° Le moyen qu'on emploie de préférence pour la mesure des potentiels élevés, cas où l'électromètre est précieux, consiste à réunir l'un des couples de secteurs à l'aiguille et au point de potentiel inconnu ($V' = v$), d'autre part on met le second groupe en communication avec la terre ($V = o$).

Dans ces conditions la formule (1) se réduit à

$$C\alpha = K v^2$$

La déviation α est donc proportionnelle au carré de la différence v des potentiels des deux parties; posons

$$v^2 = k\alpha$$

On fait ensuite une seconde expérience en remplaçant le corps dont on cherche le



potentiel par une pile de force électromotrice considérable. Cette pile est formée d'un grand nombre de petits éléments disposés en série ou encore d'accumulateurs minuscules, à lames de plomb mises dans l'eau acidulée, et chargés au préalable. On connait la différence de potentiel v' qui règne entre les pôles de la série et on relie le pôle + à l'aiguille, l'autre pôle étant au sol ; une nouvelle déviation α' est mesurée et l'on a

$$v'^2 = k\alpha'$$

On conclut, de la comparaison des deux relations, la formule

$$\frac{v^2}{v'^2} = \frac{\alpha}{\alpha'}$$

d'où

$$v = v' \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha'}}$$

2° Pour évaluer au contraire une *faible* différence de potentiel, on établit cette différence entre les deux paires de quadrants et on porte l'aiguille à un niveau élevé (par communication avec le pôle + de la pile ou de la petite batterie, dont le pôle — est à la terre). La formule (1) peut s'écrire.

$$C\alpha = 2\,K\,(V' - V)\left(v - \frac{V + V'}{2}\right)$$

Or $\frac{V+V'}{2}$ est petit et négligeable devant v de sorte qu'il reste *approximativement*

$$C\alpha = 2\,Kv\,(V' - V)$$

La différence étudiée est donc proportionnelle à la déviation α.

$$V' - V = k\alpha$$

On fait une seconde expérience, avec la même pile de charge, mais en chargeant les secteurs au moyen d'une pile étalon présentant la différence de potentiel $e = V'_1 - V_1$ entre ses bornes ; la déviation observée est α_1 et l'on a

$$e = V'_1 - V_1 = k\alpha_1$$

d'où

$$\frac{V' - V}{e} = \frac{\alpha}{\alpha_1}$$

et

$$V' - V = e\,\frac{\alpha}{\alpha_1}$$

3° On peut enfin relier à l'aiguille le point au potentiel inconnu v et charger les deux paires de secteurs à des potentiels égaux et contraires.

Pour ce dernier point on réunit chaque groupe à l'un des pôles d'une série de piles

ou d'accumulateurs dont le centre est à la terre ; alors $V = - V'$ et la formule (1) donne *exactement.*

$$C\alpha = 4\,K V v$$

En répétant l'expérience, avec la même pile de charge, mais au moyen d'un étalon (pôle +, le pôle — étant au sol) on a, si e = potentiel de ce pôle +, c'est-à-dire la f-é-m de l'élement.

$$C\alpha' = 4\,K\,V e$$

α' étant la nouvelle déviation.

Par comparaison il vient

$$\frac{v}{e} = \frac{\alpha}{\alpha'}$$

d'où

$$v = e\,\frac{\alpha}{\alpha'}$$

Voltmètres électrostatiques. — Certains électromètres ont été combinés de manière à donner en volts, par une simple lecture, les différences de potentiel.

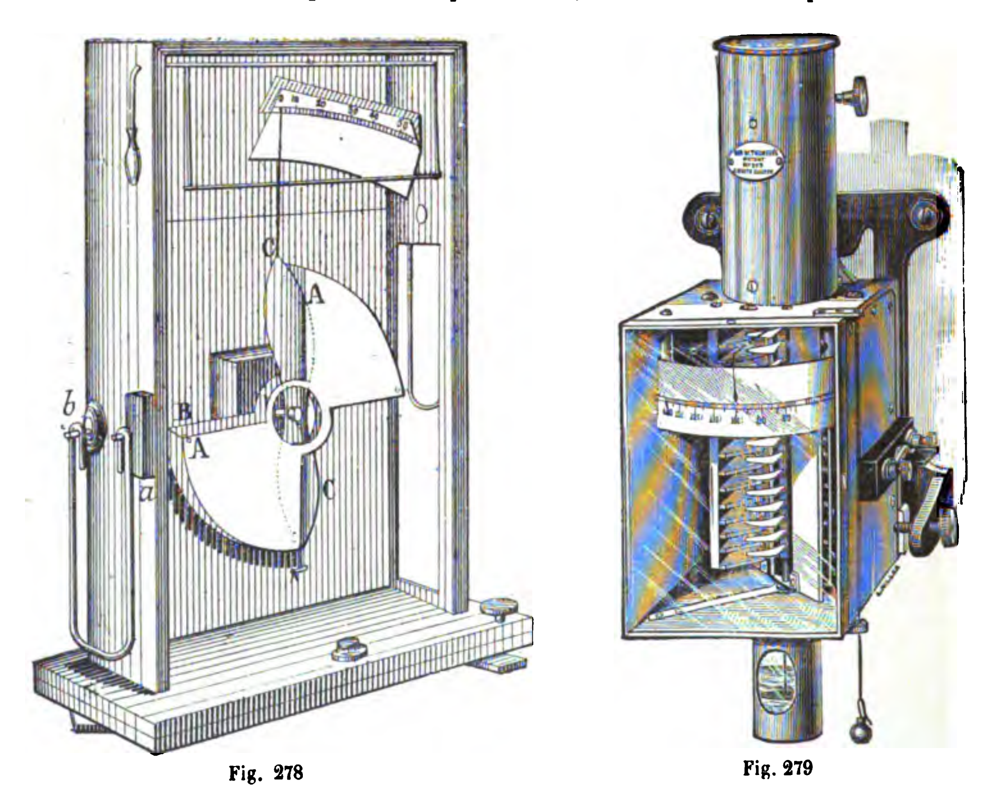


Fig. 278 Fig. 279

Lord Kelvin en a fait construire plusieurs modèles : l'un d'eux (fig. 278) destiné aux hautes tensions consiste en une seule paire de lames fixes AA et B entre les-

quelles peut tourner l'aiguille légère d'aluminium C déjà décrite et qui porte d'un côté un index, de l'autre un petit poids, variable à volonté, destiné à équilibrer l'action électrostatique. On réunit les extrémités du conducteur entre lesquelles on désire connaître la force électromotrice à deux bornes telles que *a* placées de chaque côté de la boîte et en avant. Ces bornes communiquent chacune, par l'intermédiaire d'une résistance considérable disposée dans un tube en U, avec une autre borne *b* reliée l'une aux secteurs AB; l'autre à l'aiguille. On constate alors un déplacement de l'index sur le cadran; et, suivant le poids attaché à la partie mobile, chaque division représente un nombre déterminé de volts. On peut ainsi évaluer des voltages de 200 à 20.000.

Pour les voltages modérés (de 30 volts à 2.400), lord Kelvin a imaginé son *voltmètre multicellulaire* (fig. 279).

Cet appareil comprend une série de quadrants superposés agissant sur un système de palettes toutes solidaires et pouvant se déplacer, grâce à un fil métallique mince. L'ensemble entraine un index léger, en aluminium qui marque ses déplacements sur un cadran gradué.

2° Méthode du condensateur. — Il s'agit de déterminer la différence de potentiel entre deux points A et B (fig. 280) soit x. On relie ces points aux deux bornes d'un condensateur C de capacité C; cet appareil prend la charge Cx. Cette quantité déchargée ensuite dans un galvanomètre balistique G produit une impulsion α de l'aiguille et l'on a

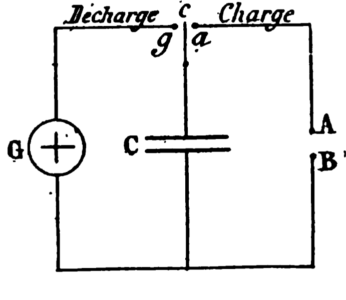


Fig. 280.

$$Cx = K\alpha \quad (1)$$

Si l'on connaît C et K il est donc facile d'évaluer x.

$$x = \frac{K}{C}\alpha$$

La figure indique suffisamment le montage des appareils.

Si on ne connait ni K ni C, on fait une seconde expérience :

La source étudiée est remplacée par une pile-étalon de force électromotrice E, d'où une quantité d'électricité : CE, qui produit une impulsion α'

$$CE = K\alpha' \quad (2)$$

Comparant les équations (1) et (2), nous obtenons

$$\frac{Cx}{CE} = \frac{K\alpha}{K\alpha'}$$

ou

$$\frac{x}{E} = \frac{\alpha}{\alpha'}$$

et

$$x = \frac{\alpha}{\alpha'} \times E$$

La charge et la décharge sont obtenues à volonté au moyen d'une clef représentée dans son ensemble (fig. 281), le levier mobile *c* (fig. 280) peut être amené

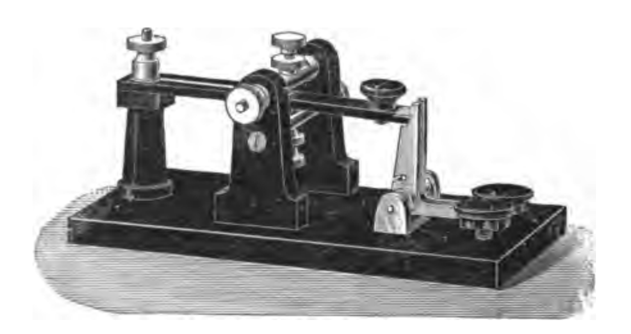


Fig. 281.

soit contre une borne *a* communiquant avec la source (*charge*), soit contre une autre *g* reliée au galvanomètre (*décharge*) ; il peut aussi occuper une position intermédiaire.

Enfin si l'on veut éviter l'erreur provenant du déplacement du zéro de l'échelle, on a une clef spéciale dite d'*inversion*, qui permet de renverser le courant de charge au moyen de deux leviers. On lit alors deux déviations, de part et d'autre du milieu de la graduation, et l'on en prend la moyenne.

Voici le détail des opérations à effectuer dans cette mesure :

1° Le condensateur est d'abord mis en court-circuit, pour éviter l'action d'une charge antérieure.

2° On effectue la charge par le déplacement convenable du levier et en maintenant quelques instants le contact.

3° Par le jeu de la clef on décharge brusquement le condensateur dans le galvanomètre balistique.

4° Après lecture des trois premiers écarts on corrige l'impulsion primitive et l'on a α.

S'il y a lieu on répète une nouvelle détermination en renversant le courant d'où α_1 et l'on prend la moyenne $\frac{\alpha + \alpha_1}{2}$ au lieu de α.

On recommence ensuite identiquement de la même manière avec la source étalon.

3° **Méthodes électro-magnétiques.** — Nous grouperons sous ce nom tous les procédés qui font usage des galvanomètres pour la mesure des forces électromotrices. On conçoit la possibilité d'effectuer cette détermination : en effet, la différence de potentiel *e* produit un déplacement d'électricité et le courant obtenu dépend de cette différence ; il peut donc servir à l'évaluation de *e*.

Nous examinerons d'abord l'emploi des galvanomètres ordinaires *gradués en volts*, puis nous verrons les appareils étalonnés, les *voltmètres électro-magnétiques*. Ensuite nous parlerons des *méthodes de compensation*. Jusque-là nous n'aurons fait

que des *mesures directes* ou *relatives*. Il nous restera à indiquer une *méthode absolue* ne nécessitant pas l'emploi d'étalon.

Galvanomètres étalonnés en volts. — Supposons un galvanomètre placé sur un circuit de résistance donnée R. Si entre les extrémités de ce circuit, nous établissons une différence de potentiel E, nous provoquons un courant dont l'intensité est

(1) $$I = \frac{E}{R}$$

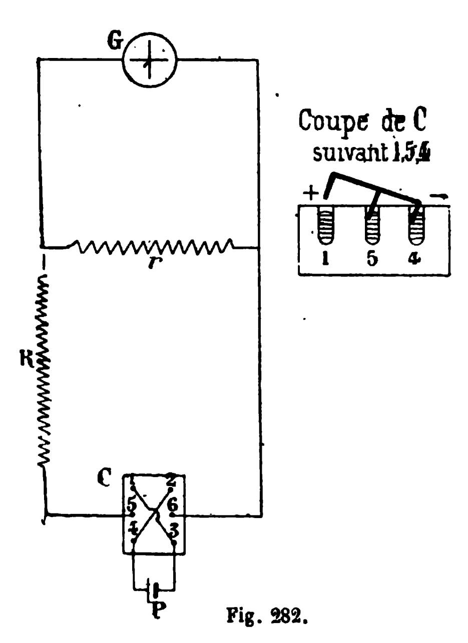


Fig. 282.

c'est-à-dire proportionnelle à E. Or, les déviations de l'appareil de mesure varient proportionnellement aux intensités; il y a donc aussi proportionnalité, d'après (1), entre les voltages et les écarts de l'index α. On aura donc, si on se place dans des conditions convenables

(2) $$E = K\alpha$$

Le galvanomètre, ordinairement du type Deprez-d'Arsonval, est en G (fig. 282). S'il sert spécialement à cet usage, il est de préférence à fil de maillechort, comme les boites de résistances qui lui sont associées, de façon à ce que les coefficients de température soient les mêmes dans toutes les parties, cette variation étant d'ailleurs très faible. Dans le circuit de cet appareil on place la résistance R considérable et comme shunt on fait usage d'une boîte *r*. Cela posé, il faut étalonner le galvanomètre, c'est-à-dire déterminer la déviation qui correspond à une différence de potentiel donnée. S'il s'agit de faibles f.é.m. nous pourrions nous proposer de faire correspondre chaque millimètre d'écart à $\frac{1}{100}$ volt. Nous prendrons donc un élément étalon, celui du Post-Office, pour fixer les idées, monté comme il a été dit page 278 ; sa f.é.m. égale 1,07 volt; nous le relions aux extrémités du circuit du galvanomètre; l'appareil dévie et l'écart en général n'a pas la grandeur voulue, mais nous pouvons faire varier la déviation, par tâtonnement, en agissant sur les deux boîtes R et *r* et nous arrivons aisément à lui donner la grandeur de 107 millimètres. Il s'agit ensuite de se mettre à l'abri des erreurs de centrage de la règle; pour cela nous faisons usage d'un petit *renverseur* de courant C; il est formé par une planchette creusée de six trous remplis de mercure. Les trous extrêmes 1, 2, 3 et 4 sont reliés en croix comme l'indique la figure; la pile est attachée d'une façon permanente à 3 et à 4; les trous impairs sont donc en communication avec le pôle — et les trous pairs avec le pôle +. Quant à 5 et à 6,

ils appartiennent au circuit du galvanomètre ; pour les relier à volonté aux deux pôles de la source, on se sert d'une pièce de cuivre formée de deux parties semblables dont l'une se voit sur le détail de la figure. Avec la disposition supposée, le pôle + est réuni à 5 ; en même temps le pôle — communique avec 6. Il suffit de faire basculer l'appareil pour renverser les connexions.

Voici dès lors le détail des opérations à effectuer :

1° Monter les appareils suivant le schéma (fig. 282), la pièce mobile du renverseur étant enlevée pour empêcher le courant de passer ;

2° Mettre le basculeur dans une position quelconque et observer la déviation en général différente de 107 millimètres ;

3° Agir sur les résistances jusqu'à amener l'écart à égaler 107 millimètres ;

4° Renverser le courant ; la déviation change de sens ; si elle ne reste pas de 107 divisions, déplacer légèrement l'échelle et agir sur les résistances pour atteindre le résultat visé. Bien s'assurer que l'écart est resté de 107 dans le premier sens ; sinon continuer les tâtonnements jusqu'à l'égalité de chaque déviation à 107 millimètres.

Si l'on veut déterminer ensuite la f.é.m. d'une source quelconque, on substitue cette source à l'étalon et l'on obtient immédiatement la valeur cherchée en centièmes de volt.

De cet étalonnage *établi expérimentalement* nous pouvons passer, *par le calcul*, à un autre quelconque. Supposons que nous désirions faire correspondre à 1 millimètre, au lieu de $\frac{1}{100}$ volt un nombre de volts n plus grand ou plus petit que 1 ; nous avons noté R et r qui donnent la précision d' $\frac{1}{100}$ volt ; avec ces deux valeurs R et r, le courant qui passe dans le galvanomètre lorsque la f.é.m. égale $\frac{1}{100}$ volt est

$$i = \frac{\frac{1}{100}}{\text{Résist. totale}}$$

Or cette résistance totale se compose de R et du circuit complexe G, r. La résistance de ce dernier est (voir page 81).

$$\frac{gr}{g+r}$$

si l'on nomme g la résistance du galvanomètre. On a donc

$$i = \frac{\frac{1}{100}}{R + \frac{gr}{g+r}} \tag{3}$$

Nous voulons maintenant que le même courant (qui produit une déviation d'un

millimètre), soit dû à une f.é.m : n; les résistances R′ et r' devront être telles que

$$i = \frac{n}{R' + \frac{gr'}{g + r'}} \tag{4}$$

Egalons ces deux expressions de i; nous aurons une relation entre R,r,R′,r'

$$\frac{\frac{1}{100}}{R + \frac{gr}{g + r}} = \frac{n}{R' + \frac{gr'}{g + r'}} \tag{5}$$

Nous pourrons nous fixer r' *apriori* de façon à donner à R′, d'après (5), une valeur raisonnable (pas trop petite surtout, pour éviter le passage d'un courant trop considérable dans cette résistance). On peut ainsi obtenir un étalonnage variable de $n = 5$ volts à $n = \frac{1}{3000}$ volt.

Remarque. — Il est bon de ne pas employer d'écarts supérieurs à 150 millimètres environ; au delà de cette limite, la proportionnalité de la déviation à l'intensité ne serait plus rigoureuse.

Voltmètres électro-magnétiques. — Il s'agit de déterminer, par une simple lecture, la différence de potentiel cherchée. Soient deux points A et B pouvant faire partie d'un circuit traversé par le courant (fig. 283). Nous les relions aux deux bornes d'un galvanomètre G de manière à établir le courant, ou simplement une dérivation (si le courant existe déjà dans un fil).

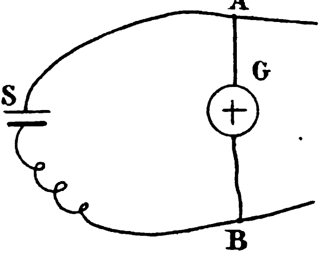


Fig. 283.

L'intensité du flux d'électricité AB est donnée par le quotient de e, différence de potentiel actuelle entre A et B, par r résistance de AB, galvanomètre compris.

Mais l'établissement du fil AB modifie les conditions primitives et il se peut très bien que la différence de niveau e ne soit plus celle qui existait avant la mise en place du pont; et cet effet est d'autant plus marqué que la branche est moins résistante par rapport au circuit BSA qui contient la source électrique. Pour fixer les idées, supposons à la résistance de BSA une valeur de 10 ohms; soit de 10 ohms également celle de AB avec l'instrument de mesure; la chute de potentiel se fait alors moitié dans le fil BSA, moitié dans AB et la différence de niveau tombe à la moitié de sa valeur primitive quand on ferme le circuit sur le galvanomètre.

Si, au contraire, avec la même source, nous prenons un fil très résistant AB, 1,000 ohms par exemple, la résistance totale est 1.010 ohms et les différences de potentiel entre A et B, avant et après l'interposition du voltmètre, sont entre elles comme $\frac{1000}{1010} = 0,99$. L'erreur commise n'est que de $\frac{1}{100}$.

Ainsi nous devons employer un galvanomètre le plus résistant possible. Admettons cette condition remplie et soit r la résistance de l'appareil; ce dernier marque une intensité i donnée par le quotient : $i = \frac{e}{r}$. Pour une autre différence de potentiel e', le même instrument indiquerait i', tel que : $i' = \frac{e'}{r}$. Les indications d'intensité sont alors proportionnelles aux forces électromotrices.

On peut donc graduer le cadran en volts, et l'on a alors un *voltmètre*.

Mode d'emploi des voltmètres. — L'appareil est toujours de très grande résistance et il faut le mettre *en dérivation* entre les points qui présentent la différence de niveau cherchée.

Ce passage de l'électricité, quoique très faible, en raison même de la valeur de la résistance, ne doit pas être prolongé au delà du temps nécessaire à la lecture. Il y aurait en effet deux inconvénients à laisser le voltmètre en fonctionnement : 1° Le fil finirait par s'échauffer d'une façon dangereuse pour l'isolant et pour le conducteur lui-même ; 2° L'élévation de température changerait la résistance de l'instrument et, par suite, altérerait les indications. Pour permettre de consulter le voltmètre à volonté, on installe, entre les points A et B, deux conducteurs : l'un relié directement au voltmètre, l'autre interrompu et pouvant être rétabli par une clef, généralement un interrupteur à bouton ou à levier. Il faut alors exercer une pression pour mettre en service l'appareil de mesure et aussitôt la lecture faite le voltmètre est retiré du circuit.

Il existe cependant des appareils disposés spécialement pour rester constamment en circuit sans danger. Les indications sont alors permanentes.

Divers genres de voltmètres. — Ces appareils ne diffèrent des ampèremètres que par leur grande résistance et par une graduation spéciale. On peut donc, à chaque type d'ampèremètre, faire correspondre un voltmètre. Il y a, dans ces appareils, des précautions spéciales à prendre : le bobinage est une opération délicate et l'isolant, malgré la faible section des conducteurs, demande à être très soigné. En outre l'emploi de la graduation suppose au fil une résistance constante ; il faut donc adopter des conducteurs ayant un faible coefficient de température ; le plus souvent il y a deux bobines : l'une, en cuivre, est la partie agissante ; l'autre est un enroulement additionnel, en maillechort.

Dans le modèle *Deprez-Carpentier*, on emploie des aimants permanents en acier au tungstène d'Allevard, trempé à 800°. Ces aimants sont fractionnés en lames pour faciliter la trempe. De cette manière l'aimant résiste bien à l'action démagnétisante de la bobine.

Parmi les modèles à circuit mobile, on citera les voltmètres *Weston* (voir l'ampèremètre de même construction).



Les voltmètres *Chauvin et Arnoux*, très employés actuellement (fig. 284), sont constitués comme les ampèremètres de la même marque. Ils sont à sensibilité variable. La bobine mobile a une résistance de 75 ohms environ et, pour dévier de toute l'étendue de l'échelle, elle demande un courant de $\frac{5}{1000}$ ampère environ. Cet enroulement est disposé en série avec une bobine à faible coefficient de température, en maillechort par conséquent, et il faut que la somme des deux résistances soit proportionnelle à la force électromotrice maxima que l'on aura à mesurer. Ainsi, par exemple, si nous voulons que, sous 3 volts, le voltmètre dévie de toute l'étendue du cadran ($i = 0{,}005$) nous ferons en sorte que

$$\frac{3}{\text{Résist. totale}} = 0{,}005$$

d'où

$$\text{Résistance totale} = \frac{3}{0{,}005} = 600$$

Il reste donc à donner au fil de maillechort une résistance

$$600 - 75 = 525 \text{ ohms}$$

De même si l'appareil doit servir jusqu'à 600 volts, il faut une résistance totale

$$\frac{600}{0{,}005} = 120.000 \text{ ohms}$$

soit pour la bobine additionnelle

$$120.000 - 75 = 119.925 \text{ ohms}$$

Toutes ces résistances additionnelles sont mises en série entre elles et avec



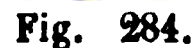


Fig. 284.



Fig. 285.

la bobine mobile. L'origine de la série, c'est-à-dire l'extrémité libre du cadre, communique avec une borne extérieure marquée +. Chacune des autres bornes est destinée

à servir de pôle négatif et cela suivant la sensibilité que l'on désire. La figure 284 représente un voltmètre Arnoux et Chauvin, à sensibilité invariable ; elle ne montre par conséquent qu'une seule borne négative.

On peut encore citer le voltmètre Weston. Les modèles Hartmann et Braun et Richard sont des voltmètres thermiques ; la figure 285 représente le type *Richard* disposé pour l'enregistrement.

Réducteurs. — Un instrument à sensibilité constante peut être néanmoins employé pour des voltages supérieurs à ceux que marque le cadran. On fait pour cela usage de *réducteurs*.

Ce sont des résistances additionnelles de valeurs égales à une, deux ou trois fois celle de l'instrument.

On met ces fils en série avec l'appareil de mesure; supposons qu'on emploie le premier : le courant dérivé entre les points A et B (fig. 283) est réduit à la moitié de sa valeur puisque la résistance totale est double de celle du voltmètre seul. Dans ce cas, l'indication observée doit être doublée et le voltmètre, s'il s'étend de 0 à 120 volts, peut servir de 0 à 240. De même en supposant une résistance additionnelle double de celle de la bobine voltmétrique, on réduit au tiers de sa valeur le courant dérivé et le nombre de volts observé doit être triplé ; l'appareil est disposé alors pour marquer de 0 à 360 volts, et ainsi de suite.

Méthodes de compensation. — Comme le nom de la méthode l'indique, il s'agit d'équilibrer une différence de potentiel par une autre différence, celle-ci pouvant être connue. Les procédés en usage sont nombreux ; dans tous on emploie un galvanomètre chargé de marquer la compensation parfaite par l'absence de déviation. Ce sont alors des *méthodes de réduction à zéro* : elles ont l'avantage de permettre l'emploi du galvanomètre avec son maximum de sensibilité, car on peut, en effet, supprimer tout shunt, quand on termine l'établissement de l'équilibre.

Voici le principe de l'une des méthodes, celle de Poggendorff :

Imaginons (fig. 286) une pile p à comparer à l'étalon p' (p est supposée de force électromotrice e supérieure à celle de p' : e' ($e > e'$). Sur le circuit de p nous disposons deux résistances r et r' prises sur deux boîtes et par conséquent variables à volonté. Entre deux points A et B du circuit ainsi constitué, nous disposons une dérivation comprenant un galvanomètre G, une clef C' et la pile étalon p' en opposition avec p (les pôles de même nom sont en effet rattachés l'un à l'autre). Les courants de p et de p' étant opposés, il est possible d'annuler

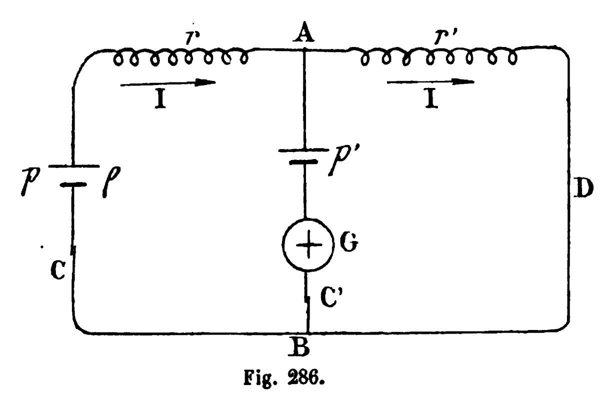


Fig. 286.

complètement l'intensité dans la branche AB, en faisant varier, d'une manière convenable, les résistances r et r'. Ce résultat obtenu, le galvanomètre reste au zéro. On a pu le shunter tout d'abord pour le protéger, mais quand la compensation est sensiblement obtenue, rien n'empêche de supprimer le shunt, ce qui permet de parfaire l'équilibre du système.

Cela posé, l'intensité est la même dans la partie pA et dans Ar'B, soit I ; nous pouvons appliquer la loi de Kirchhoff aux circuits fermés pAB et pADB ; nous avons dans p A B

$$I(\rho + r) = e - e'$$

(en effet l'intensité est nulle dans AB)

De même dans p A D B

$$I(\rho + r + r') = e$$

Comparons les deux équations, il vient

$$\frac{\rho + r}{\rho + r + r'} = \frac{e - e}{e}$$

ou, d'après une propriété des proportions

$$\frac{r}{e'} = \frac{\rho + r +}{r'}$$

d'où nous tirons

$$e = e' \times \frac{\rho + r + r'}{r'}$$

Souvent même le terme ρ peut disparaître car la résistance intérieure est peu considérable à côté des bobines r et r'.

Alors la relation se simplifie et devient

$$e = e' \times \frac{r + r'}{r'}$$

Mesure absolue d'une force électromotrice. — La méthode de *compensation* employée dans ce but consiste à *opposer* à la source étudiée la différence de potentiel qui existe entre les deux extrémités d'un conducteur de résistance connue R traversé par un courant d'intensité I, mesurée par méthode absolue.

Cette différence de potentiel est donc

$$e = I \times R$$

Si nous parvenons à contre-balancer l'action de la pile de f.é.m. x, nous pourrons écrire

$$x = I \times R$$

Voici comment on applique ce principe :

La source étudiée p est mise en circuit avec la résistance connue R, un galvanomètre G et un interrupteur α

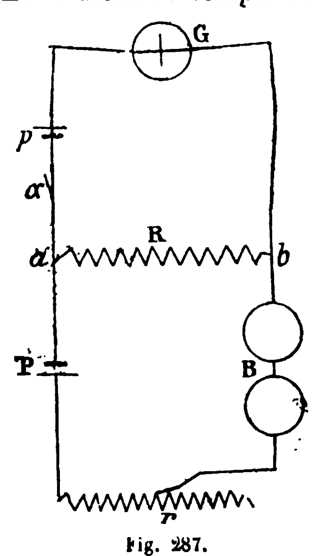


Fig. 287.

(fig. 287). On constitue ensuite un deuxième circuit comprenant la même résistance R, un rhéostat réglable r, la balance électrodynamique Kelvin B et une source P de f.é.m. supérieure à celle que l'on cherche. On a soin d'ailleurs de mettre en opposition les deux piles comme le montre le schéma.

Dans ces conditions, le courant qui traverse le galvanomètre est dû aux actions simultanées des deux différences de potentiel x d'une part et $I \times R$ d'autre part. Si ces deux quantités diffèrent, le galvanomètre dévie : on s'en assure en appuyant un instant sur le contact α. La partie du rhéostat r introduite dans le circuit est alors modifiée et, sans s'occuper pour l'instant de la balance de Thomson, on voit comment se comporte le galvanomètre. Après une série de tâtonnements l'appareil de mesure reste au repos. Alors on peut écrire

$$x = I \times R$$

On connaît R; il reste à déterminer I. Pour cela le courant est maintenu dans le circuit de P et l'on mesure, comme cela a été indiqué (voir page 268), la valeur de I.

CHAPITRE V

MESURE DES RÉSISTANCES

Etalons et boîtes de résistances. — Nous avons vu quelle est la valeur de l'unité internationale de résistance, l'*ohm*. C'est la résistance d'une colonne de mercure ayant une longueur de 106,3 centimètres et de section constante telle que la masse soit à 0° de 14,4521 grammes.

La fabrication d'un étalon n'est qu'une opération mécanique qui consiste dans le calibrage d'un tube. Les extrémités de ce canal sont munies de coupes larges dans le mercure desquelles plongent les fils destinés à relier la résistance au circuit.

Pour la commodité des mesures, on construit des *étalons secondaires* qui sont ou à mercure ou solides. Les copies de l'ohm, en mercure, sont constituées par un tube en verre replié sur lui-même et logé dans un récipient. Les extrémités seulement de la colonne émergent et peuvent recevoir les conducteurs (fig. 288).



Fig. 288.

Les étalons secondaires solides sont en alliages divers parmi lesquels on doit signaler :

Le maillechort.	(Cu 60, Zn 25, Ni 15)
La manganine.	(Cu 84, Mn 12, Ni 4)

Les bobines se font à enroulement double pour éviter la self-induction ; elles sont protégées par une enveloppe de cuivre et leurs extrémités sortent de la boîte pour aboutir aux tiges destinées à entrer dans de petites coupes à mercure où arrive le courant. Un thermomètre indique la température de l'étalon et en effet la valeur exacte de la résistance dépend de l'état de chaleur par une formule



Fig. 289.

$$R_t = R_o (1 + Kt)$$

K étant le *coefficient* dit *de température*.

Il faut remarquer que le bobinage à double enroulement présente un inconvénient ;

il augmente la capacité électrique des bobines qu'il transforme en une sorte de condensateur.

Il faut en outre des multiples et des sous-multiples de l'ohm. Ces nouvelles résistances sont formées de bobines toujours à enroulement double et enfermées dans une boite en bois à couvercle d'ébonite. Elles sont isolées soigneusement les unes des autres, le fil est garni de soie, et l'ensemble de toutes les bobines est noyé dans de la paraffine.

Les boites de résistances sont disposées de diverses façons :

I. Voici d'abord le modèle le plus simple : les extrémités de la première bobine vont aboutir à deux points *a* et *b* pris sur des blocs de cuivre A et B (fig. 290). Ces deux

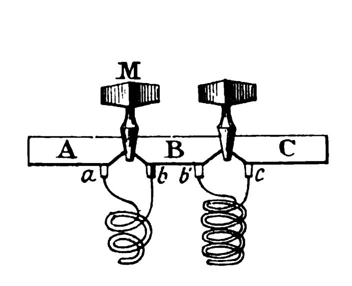


Fig. 290.



Fig. 291.

conducteurs A et B sont séparés l'un de l'autre par un intervalle de forme légèrement tronconique pouvant être comblé par une cheville métallique M à tête isolante. Chaque interruption des bandes de cuivre répond ainsi à une bobine de résistance et les extrémités de ces gros conducteurs aboutissent au circuit dans lequel on veut introduire la résistance. Supposons tous les vides remplis par des chevilles : le courant ne rencontre aucune résistance appréciable. Enlevons une ou un plus grand nombre de fiches ; nous forçons l'électricité à passer dans les bobines correspondantes. Or les diverses bobines ont des résistances qui sont entre elles dans les rapports (fig. 291) :

1	2	2	5
10	20	20	50
100	200	200	500 etc.

Alors, en débouchant les trous convenables, on introduit toutes les résistances comprises entre 1 et 1.000 ou 1 et 10,000, etc. On peut même partir de 0,1 ohm si on le veut.

II. Mais le système oblige à faire une addition. Pour éviter cette opération, on a imaginé les *boîtes à décades* qui contiennent une série de neuf bobines d'un ohm chacune, neuf autres de 10 ohms, neuf de 100, etc ; les bobines sont d'ailleurs disposées de deux façons :

Toutes les neuf peuvent être mises en ligne droite et séparent les pièces de cuivre marquées 0, 1, 2, etc. Une cheville métallique permet de relier l'une quelconque de ces lames à une autre partie AB faisant corps avec la bande 0 de la deuxième série, et ainsi de suite. L'observation de la figure 292 fait immédiatement comprendre le mode d'emploi de la boîte : supposons quatre séries de 1,000 ohms, 100, 10 et 1 ohm ; les extrémités du courant aboutissent aux deux points marqués + et — ; les quatre chevilles, mises en ligne droite, entre ces points, assurent à l'électricité un passage sans aucune résistance appréciable. Si l'on veut introduire une résistance dans le circuit, il faut déplacer les fiches : la première mise devant le numéro 5 nous indique une résistance de 5.000 ohms car l'électricité doit passer dans les cinq bobines de 1,000 ohms comprises entre 0 et 1, 1 et 2, 2 et 3, 3 et 4, 4 et 5 ; la seconde cheville en 4 accuse 400 ohms et ainsi de suite ; il y a donc simplement quatre chevilles à manœuvrer pour mettre dans le circuit les résistances comprises entre 0 et 10.000 ohms. La lecture est très facile ; la figure correspond à 5.476 ohms.

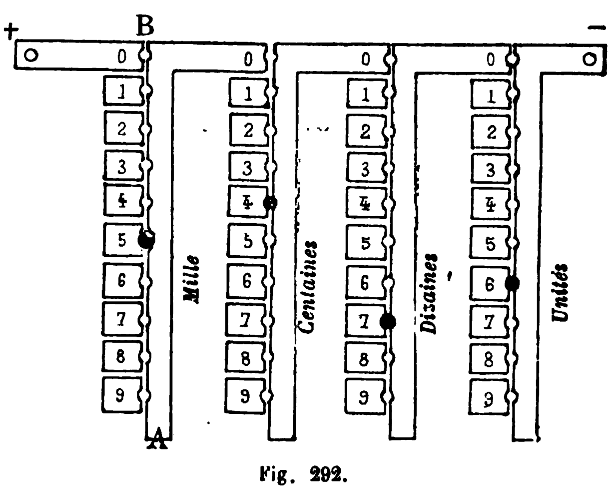


Fig. 292.

Au lieu de cette disposition, on peut grouper les bobines en circonférence, en les rattachant à diverses pièces formant des portions de secteurs et marquées 0, 1, 2,... 9. Ces plaques sont isolées d'un cercle central mais on peut à volonté, au moyen d'une cheville, ou d'un contact à manette, établir une communication entre le milieu et l'un quelconque des secteurs. Le centre est relié à la plaque zéro d'un second cadran et ainsi de suite. Il résulte de là que le nombre lu en regard du secteur relié au centre indique la résistance introduite en ohms, en dizaines d'ohms, etc., suivant la valeur des résistances de chacune des bobines de la série (fig. 293).

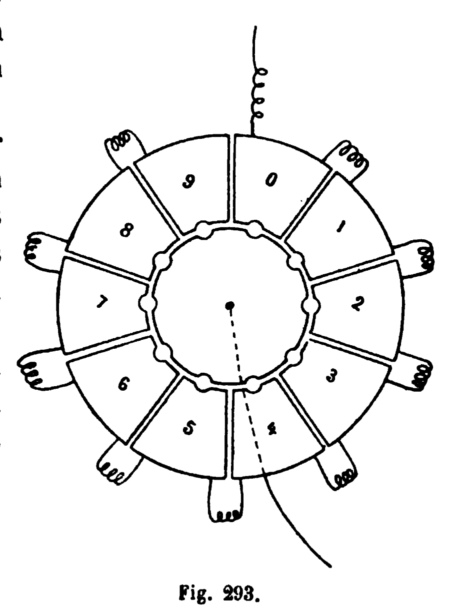


Fig. 293.

Les figures 294 et 295 représentent deux modèles de boîtes à décades construites par la maison Carpentier.

Remarque. — Il est de nécessité absolue de ne faire passer dans les bobines de résistances que des courants de très faible intensité et cela pour deux raisons : 1° Pour

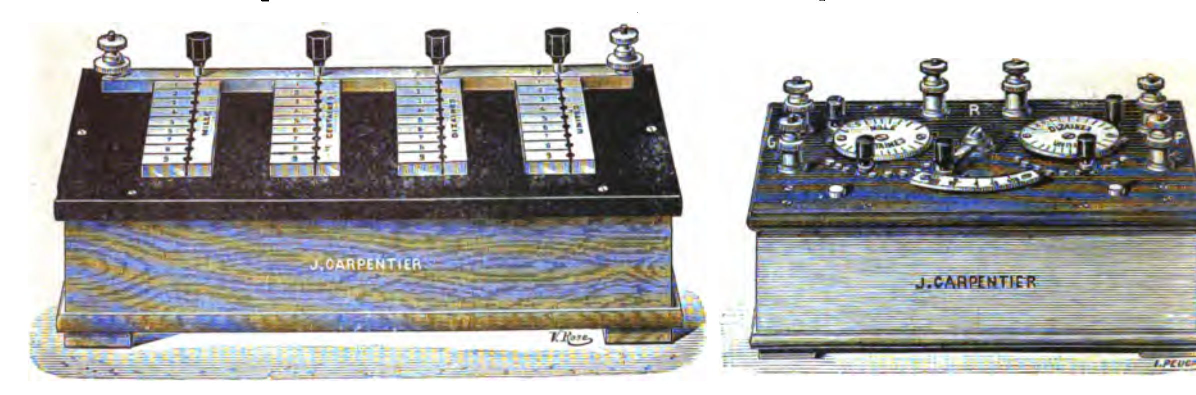


Fig. 294. Fig. 295.

éviter un échauffement appréciable et par suite une variation de la résistance ; 2° Pour ne pas brûler le fil. Quelle que soit la valeur de la résistance de la bobine, le courant doit toujours être une faible fraction de l'ampère.

Rhéostats. — Les boîtes ne permettent pas de faire varier la résistance introduite aussi lentement qu'on pourrait le désirer. On arrive au résultat au moyen d'un rhéostat de disposition très variable. Dans les laboratoires quand il s'agit de mesures précises, on prend un fil bien calibré tendu entre deux bornes A et B parallèlement à une règle CD, métallique et de forte section qui sert au retour du courant. Un contact glissant E et un autre F appuient sur le fil et sur la règle. La portion résistante est AE ; elle est mesurée par la position de l'index F sur la graduation (fig. 296).

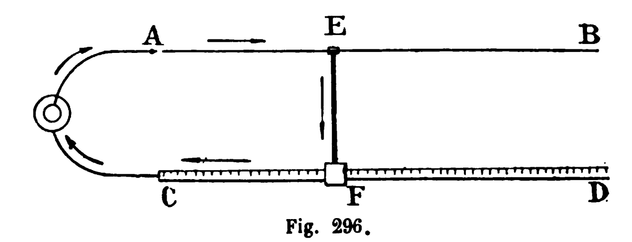


Fig. 296.

Quand les résistances sont destinées à supporter des courants intenses, on les constitue par des fils de forte section en nickeline ou en ferro-nickel, ou en maillechort. On peut également faire usage de *rhéostats à liquide*. On prend par exemple une solution de sulfate de cuivre que l'on insère par degrés variables au moyen d'électrodes mobiles de cuivre.

Méthodes de mesure. — Les méthodes que l'on emploie pour mesurer les résistances sont ordinairement *directes* ou *relatives*, c'est-à-dire que l'on fait usage des étalons qui viennent d'être indiqués.

Parmi ces méthodes, nous distinguerons :

1° Celle de *comparaison* ou de *substitution* ;

2° La méthode du *pont de Wheatstone* ;

3° Celle du *pont de Kelvin*.

A ces méthodes *directes* nous ajouterons :

4° La *méthode indirecte*, résultant de l'emploi simultané d'un ampèremètre et d'un voltmètre.

5° L'emploi des *ohmmètres*, instruments donnant les valeurs des résistances par une simple lecture.

Enfin nous aurons à faire une étude spéciale de la mesure de la *résistance à l'isolement* et une autre des *résistivités*.

1° Méthode de comparaison ou de substitution. — Dans le circuit d'une pile, on dispose la résistance inconnue et un galvanomètre convenablement shunté.

L'intensité du courant obtenu s'exprime par le quotient

$$i = \frac{e}{x + \rho + g}$$

x étant la résistance cherchée, ρ celle de la pile et g celle du galvanomètre shunté.

On remplace ensuite la résistance inconnue par une boîte et, si on le peut, on manœuvre les chevilles jusqu'à rétablir la même intensité c'est-à-dire la même déviation sur l'échelle. En supposant qu'on puisse y arriver exactement, il suffit de lire sur la boîte la valeur de la résistance égale à celle que l'on cherche. Si la déviation obtenue d'abord ne peut être reproduite rigoureusement, on détermine, à une unité près, la résistance inconnue, puis, d'après l'écart constaté sur l'échelle, on fait une interpolation pour la fraction à ajouter.

Le procédé demande à être modifié quand il s'agit de résistances très considérables car les boîtes ne contiennent pas de fils aussi résistants :

Dans la première expérience, on emploie une pile d'un grand nombre d'éléments et le galvanomètre n'a pas besoin ordinairement d'être shunté ; on détermine une déviation α proportionnelle à l'intensité

$$i = \frac{E}{x + \rho + g} = K\alpha$$

Dans la seconde, on place la résistance R la plus considérable dont on dispose ; le galvanomètre est fortement shunté et on réduit la pile à un couple seulement. On a alors une déviation α' correspondant à une intensité i', pour la valeur m du pouvoir multiplicateur

$$i' = \frac{e}{R + \rho' + g'} = Km\alpha'$$

ρ' est la résistance de la pile employée, g' celle du galvanomètre shunté, soit $\frac{g}{m}$.

Comparons alors ces deux expressions ; il vient

$$\frac{x + \rho + g}{R + \rho' + g'} = \frac{E}{e} \cdot \frac{Km\alpha'}{K\alpha} = \frac{E}{e} \cdot \frac{m\alpha'}{\alpha}$$

Le rapport $\frac{E}{e}$ est égal au nombre n des piles de la première opération (puisqu'il reste un seul élément dans la seconde) et il est facile de tirer de là la valeur de x. Ordinairement cette résistance est très grande relativement à ρ et à g; il en est de même de R à côté de ρ' et g'. Alors on écrit simplement

$$\frac{x}{R} = n \frac{m\alpha'}{\alpha}$$

d'où l'on tire de suite x. Cette méthode, ainsi modifiée, trouvera son application dans la mesure de l'isolement d'une canalisation.

2° **Méthode du pont de Wheatstone.**— C'est le procédé le plus ordinairement employé. Considérons la disposition suivante : le circuit d'une pile P (fig. 297) est bifurqué entre les points A et C dans les deux branches ABC et ADC. Sur ces deux dérivations, on prend deux points B et D que l'on réunit par un conducteur comprenant le galvanomètre G. En général il arrive que ce *pont* BD est traversé par un courant allant dans un sens ou dans l'autre suivant le signe de la différence de potentiel existant entre B et D; alors le galvanomètre marque une certaine déviation. Mais on peut faire en sorte que les deux extrémités de ce conducteur soient au même niveau électrique; alors G reste immobile. Nous allons chercher à quelle condition ce résultat est obtenu :

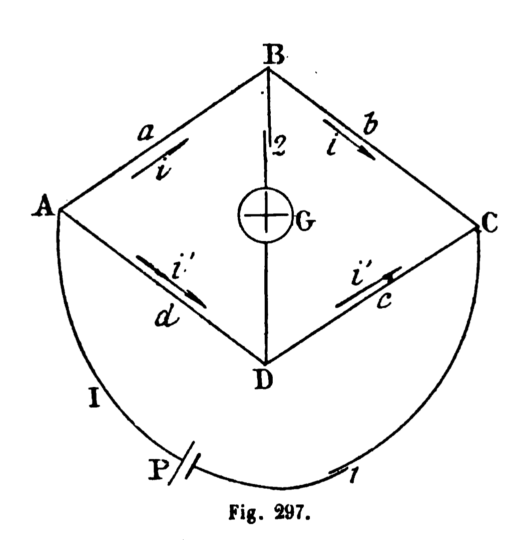


Fig. 297.

Appelons a, b, c et d les quatre résistances respectives des portions AB, BC, CD et DA; s'il n'y a pas de courant dans BD, l'intensité a la même valeur dans a et dans b d'une part, soit i, et d'autre part elle est la même dans d et dans c, soit i'. Nous voyons d'ailleurs que le courant d'intensité I dans le fil extérieur s'est partagé en deux parties au point A pour fournir les deux intensités i et i'.

Dès lors appliquons les lois de Kirchhoff aux circuits fermés ABD et BCD, dans lesquels n'agit aucune force électromotrice; nous avons dans ABD

$$ia - i'd = 0$$

(car l'intensité égale zéro dans G).

Dans BCD

$$ib - i'c = 0$$

Ainsi nous avons

$$ia = i'd$$

et

$$ib = i'c$$

Divisons membre à membre ces deux équations ; nous obtenons

$$\frac{a}{b} = \frac{d}{c}$$

Les résistances des quatre bras considérés doivent donc former une proportion et cette condition est indépendante des résistances présentées par les conducteurs contenant la pile et le galvanomètre.

Pour évaluer une résistance, on établit sur l'une des branches le conducteur étudié puis sur les trois autres des multiples convenables de l'ohm de manière à annuler la déviation de l'appareil galvanométrique. L'application de la formule trouvée donne immédiatement la quatrième proportionnelle.

Pratiquement supposons la résistance inconnue entre B et C ($x = b$). En a et en d on met deux bobines présentant entre elles un rapport connu $\frac{1}{1.000}$, $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{10}$, 1,10, 100, 1.000; enfin le bras D C reçoit une boîte de résistance sur laquelle on enlève des chevilles jusqu'à ce qu'on arrive au résultat demandé : équilibre du galvanomètre. Pour ne faire passer le courant, dans les essais, que le temps juste nécessaire à l'observation, on a deux clefs, l'une en 1, l'autre en 2 ; on ferme 1 d'abord puis 2 et l'on voit dans quel sens il convient de modifier la résistance c pour réduire à zéro la déviation de G. Alors on a :

$$x = \frac{a}{d} \times c$$

Pour plus de sécurité, on a soin de shunter le galvanomètre dans les premiers essais. Lorsqu'on approche du terme, le courant est à peu près annulé dans G et le shunt peut être supprimé sans danger pour la bobine.

On remarque que le rapport $\frac{a}{d}$ est établi d'avance :

1° S'il s'agit de mesurer une très faible résistance, on fait d grand vis-à-vis de a ; le rapport peut être $\frac{1}{1.000}$, $\frac{1}{100}$ etc. Alors : $x = \frac{c}{1.000}$ ou $\frac{c}{100}$ etc.

2° Au contraire s'agit-il d'étudier un conducteur fort résistant, on donne au rapport une grande valeur 1.000 ou 100 etc., et x est égal à 1.000 ou à 100 fois la résistance insérée dans la boîte.

3° Pour les cas où la résistance x est de grandeur moyenne, quel rapport convient-il d'établir entre a et d ? La discussion du procédé a montré qu'il y a avantage à égaliser, autant que possible, les quatre parties a, b, c et d. Alors on fait $a = d$ (en donnant à chacune de ces grandeurs la valeur la plus voisine de celle présumée pour x) et il vient

$$x = c$$

La discussion du procédé a conduit à d'autres conséquences ; on peut calculer *l'er-*



reur absolue Δx commise sur l'évaluation de x. Cette différence correspond à l'intensité la plus grande, dans la branche BD, soit Δi_0, qui passe inaperçue dans le galvanomètre. Quand ce courant traverse le pont, nous jugeons l'équilibre établi alors qu'il ne l'est pas en réalité, et la valeur de la résistance inconnue n'est pas exactement la quatrième proportionnelle calculée. De cette *erreur absolue*, nous passons aisément à *l'erreur relative*

$$\frac{\Delta x}{x}$$

et l'on trouve que cette erreur relative dépend :

1° de la *sensibilité du galvanomètre* employé ; elle est inversement proportionnelle à cette sensibilité ;

2° de la *force électromotrice* utilisée. L'erreur est également en raison inverse de cette force électromotrice.

Il faut encore tenir compte du soin apporté par l'observateur lequel juge plus ou moins bien l'absence de courant dans l'appareil. On a intérêt à choisir un galvanomètre bien amorti, à oscillations rapides et de faible résistance (toutes choses égales d'ailleurs).

Boîtes de résistances montées en pont de Wheatstone. — Il y a différentes manières d'appliquer la méthode du pont de Wheatstone ; l'une des plus commodes consiste à faire usage de boîtes de résistances spéciales *montées en pont*. Elles comprennent les diverses parties indiquées dans le schéma (fig. 297). On a employé

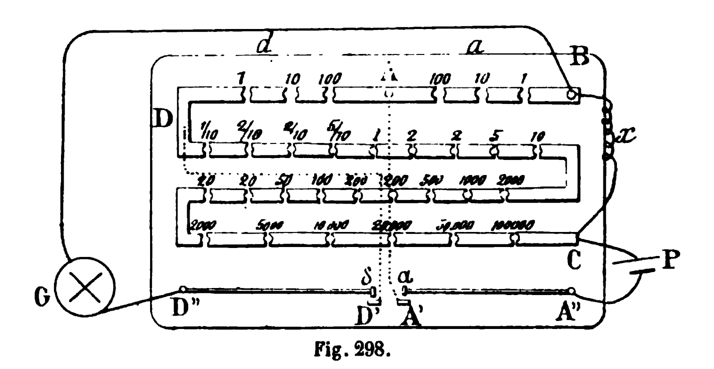


Fig. 298.

à dessein les mêmes lettres (fig. 298) pour représenter les parties correspondantes dans les deux figures. La pile est reliée aux deux points A et C (en C directement, en A par l'intermédiaire d'une clef α). Le galvanomètre G est attaché à B directement d'une part et de l'autre à D par l'intermédiaire de la seconde clef δ. Quant à la résistance inconnue, elle s'insère entre B et C. On établit le rapport voulu $\frac{a}{d}$ au moyen de deux séries de résistances DA et AB comprenant chacune trois ou quatre bobines de 1, 10, 100 et 1.000 ohms. Quant à la branche c, elle est constituée par les bobines comprises entre D et C.

Les figures 299 et 300 représentent l'ensemble de deux telles boîtes.

Voici comment on emploie ces instruments:

Le montage est fait conformément à ce qui vient d'être dit. Il est d'ailleurs facilité

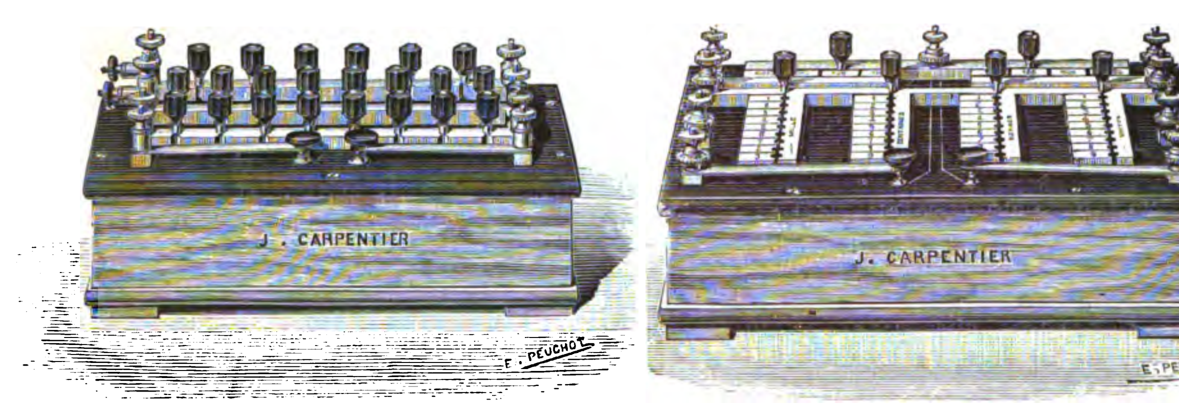


Fig. 299. Fig. 300.

par ce fait que les connexions sont indiquées ordinairement sur la boîte ; un élément d'accumulateur suffit largement avec le galvanomètre Deprez d'Arsonval, modèle Carpentier, que l'on trouve aujourd'hui dans tous les laboratoires de mesure. Les résistances en a et en d sont mises en rapport convenable avec la grandeur présumée de l'inconnue (voir page 299) ; quant au galvanomètre, il est shunté pour commencer l'expérience et, afin d'accélérer les tâtonnements, on a disposé une clef de court-circuit pour ramener immédiatement l'index au zéro après chaque essai.

L'appareil étant ainsi disposé :

1) On met en c (fig. 297) d'abord une résistance considérable soit c_1 ;

2) On appuie sur le contact de la pile, α ;

3) Tout en maintenant le contact précédent, on presse sur δ qui ferme le pont sur le galvanomètre.

Généralement l'appareil accuse un courant dont on note le sens. Les deux clefs sont abandonnées à elles-mêmes et on recommence les trois manœuvres précédentes (après avoir ramené l'index au zéro) mais en introduisant dans le bras c (expérience 1), une résistance faible c_2. La déviation est alors ordinairement opposée à la première. On recommence une autre fois en prenant c égale à la moyenne des deux premières valeurs. Admettons que le galvanomètre dévie du même côté que dans le premier essai ; nous saurons que la valeur de c doit être comprise entre c_2 et la valeur moyenne. Nous continuerons alors les essais en resserrant l'intervalle de plus en plus, ce qui nous conduit finalement à la valeur exacte de c.

Pont à fil. — Dans ce modèle, le circuit fermé ABCD du schéma (fig. 297) est constitué par un rectangle formé par trois côtés en lames de cuivre sans résistance appré-

ciable TABCDT′ (fig. 301). Le plus long de ces trois côtés présente deux interruptions principales B et C sur lesquelles on branche d'une part la résistance inconnue et de l'autre un étalon approprié. Le quatrième côté du rectangle est formé par un fil parfaitement calibré TT′ en maillechort ou en platine iridié ; ce fil a une longueur d'un mètre et devant lui se trouve une graduation en millimètres. Un curseur, qui glisse sur la règle, en appuyant, au moment voulu sur le fil calibré, partage ce fil en deux sections qui vont jouer le rôle des résistances c et d du schéma. Du curseur part l'un des fils qui se rendent au galvanomètre ; l'autre fil est relié au point c. Quant à la source d'électricité, elle communique avec les deux points a et b. Ici encore le courant est nul dans le galvanomètre quand les quatre branches forment une proportion c'est-à-dire quand on a

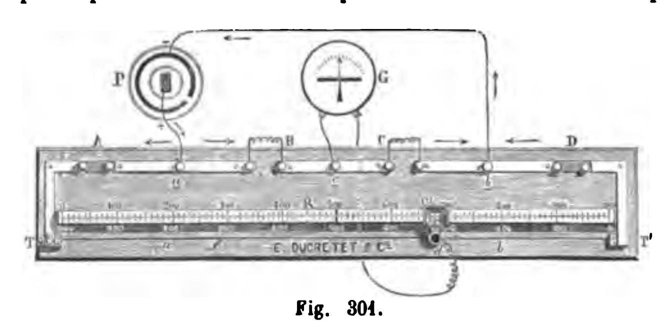


Fig. 301.

$$\frac{B}{C} = \frac{f}{b}$$

Or, les deux résistances marquées f et b sur la figure, sont proportionnelles aux longueurs respectives des segments $\overline{Td}$ et $\overline{dT'}$. Nous pouvons donc écrire

$$\frac{B}{C} = \frac{\overline{Td}}{\overline{dT'}}$$

Voici dès lors comment on fait usage de cet appareil :

On effectue le montage suivant les indications données en plaçant l'inconnue en B et un étalon d'un ohm en C. Comme source électrique on prendra un élément d'accumulateur en ayant soin de mettre un interrupteur de courant sur ce circuit. Le galvanomètre est tout d'abord shunté et une clé de court-circuit est destinée à accélérer les essais.

Chaque essai comprend les opérations suivantes :

1° Placer le curseur vers l'une des extrémités de la règle, à une distance l de T.

2° Faire passer le courant;

3° Appuyer sur le contact du curseur;

4° Noter sur une feuille de papier si la déviation se fait à droite ou à gauche. Soit, par exemple, un écart à droite, nous commencerons le tableau de la manière suivante :

gauche	droite
—	—
	l

On soulèvera ensuite le contact du galvanomètre, puis on arrêtera le courant et l'on

fera un deuxième essai comme le premier mais en disposant le curseur vers l'extrémité opposée de la règle, à une distance l' de T de façon à obtenir un écart à gauche. Nous saurons alors que la position convenable du curseur, pour assurer l'équilibre du pont, est intermédiaire aux deux précédentes. Nous ferons un nouvel essai avec une distance l_1 égale approximativement à la moyenne de l et de l' et nous noterons une déviation (gauche par exemple). La longueur cherchée est intermédiaire à l_1 et à l; le quatrième essai comportera alors une longueur de fil l_2 égale à la moyenne de l_1 et de l; s'il nous donne une déviation droite, nous avons le tableau :

gauche	droite
	l
l'	
l_1	
	l_2

L'intervalle est donc réduit à $l_1 - l_2$; nous le resserrerons de plus en plus par une série de tâtonnements toujours semblables et nous aurons ainsi finalement la valeur de l soit L, qui annule tout écart de l'index galvanométrique.

Nous pouvons alors poser, si L est exprimé en millimètres

$$\frac{x}{1} = \frac{L}{1.000 - L}$$

d'où

$$x = \frac{L}{1.000 - L}$$

Si l'on doute du parfait calibrage du fil, on peut recommencer les opérations en permutant l'inconnue et l'étalon, ce qui nous donne pour l'inconnue une nouvelle valeur x'. On prend alors pour valeur réelle X de la résistance inconnue la moyenne géométrique de x et de x'

$$X = \sqrt{x x'}$$

Résistance d'un galvanomètre. — La méthode du pont de Wheatstone se prête très facilement à cette mesure; l'appareil pourrait être traité comme un conducteur ordinaire, ce qui exigerait un second galvanomètre pour constater l'absence de courant dans le pont, mais on peut éviter l'emploi de ce deuxième instrument de la manière suivante :

Le galvanomètre se dispose sur la branche BC (fig. 302); la pile est à sa place ordinaire. Quant au pont il ne porte aucun appareil mais seulement une clef α. Sous l'influence du courant, le galvanomètre dévie et l'on peut disposer les résistances de la

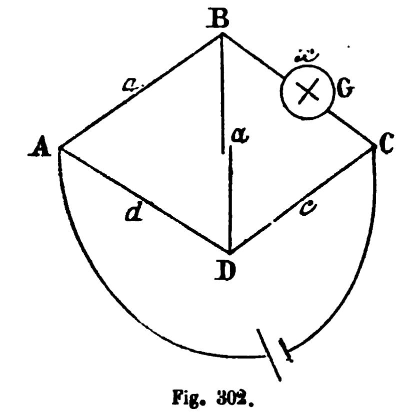


Fig. 302.

boîte de façon à ce que cet angle ne varie pas par la fermeture de la clef. La condition qui assure cette constance est

$$\frac{x}{c} = \frac{a}{d}$$

d'où l'on tire la résistance x.

Résistance d'une pile. — On peut également faire servir l'appareil étudié à la production du courant nécessaire; on met cette pile entre B et C (fig. 303) et sur le circuit qui contient ordinairement la source est simplement interposée une clef α. Le galvanomètre accuse une certaine déviation; on s'arrange de manière à maintenir cet écart constant que le fil extérieur soit coupé en α, ou qu'il ne le soit pas. Cela nécessite encore la même proportion entre les quatre résistances de l'appareil et l'on peut facilement calculer la résistance de la pile.

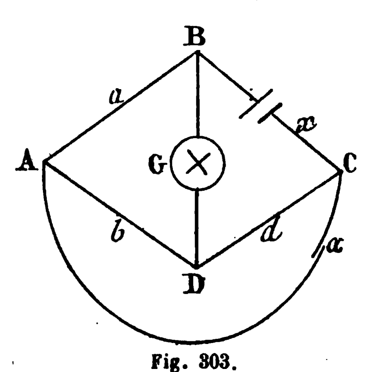


Fig. 303.

3° Méthode du pont de Kelvin. — Cette méthode s'applique aux faibles résistances, inférieures à 1 ohm. Dans ce cas, en effet, les contacts entre le conducteur étudié et les autres parties des circuits pourraient présenter des résistances du même ordre de grandeur que le conducteur lui-même; il y aurait alors une grande incertitude dans l'évaluation.

La méthode de Kelvin réalise en quelque sorte un pont double.

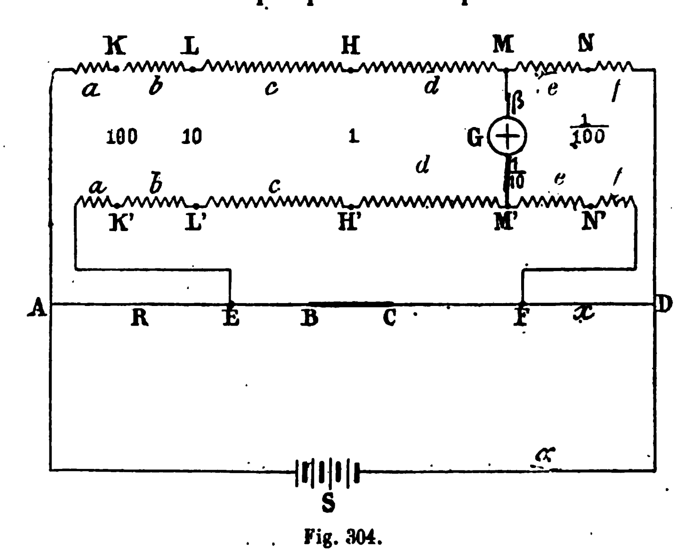


Fig. 304.

Soit CD le conducteur sur lequel doit être pris le segment FD dont on cherche la résistance (fig. 304). Ce conducteur est réuni par un court-circuit BC, à une tige métallique AB bien calibrée dont la résistance nous est connue. Dans ce conducteur AD ainsi constitué, on fait passer le courant d'une source S, par l'intermédiaire de la clef α.

Cela fait, nous établissons entre les points A et D deux dérivations :

1° l'une AHD comprenant uniquement six bobines a, b, c, d, e, f, égales deux par deux, symétriquement placées par rapport au milieu H;

2° la seconde dérivation est AEH'FD ; elle comprend, en plus de six bobines égales aux précédentes, une portion $AE = R$ de la tige calibrée, limitée par un curseur E déplaçable à volonté et la résistance inconnue $FD = x$. Pour terminer la description de l'appareil, il reste à indiquer le galvanomètre G qui se fixe à volonté entre les points K et K', ou entre L et L', H et H', M et M' ou enfin N et N'. Prenons, par exemple, la position MM' de la figure; il s'agit de régler convenablement la résistance R de AE, par rapport à x, de manière à égaliser les valeurs du potentiel en M et en M', c'est-à-dire de façon à supprimer toute déviation de l'aiguille galvanométrique.

Soit V la chute de potentiel qui se produit du point A au point D; nous devons chercher la condition qui égalise les chutes partielles : d'une part dans AM, d'autre part dans AEM' :

1° dans le premier conducteur, la résistance totale est

$$a + b + c + d + e + f$$

La chute de potentiel par unité de résistance est (voir loi d'Ohm, page 68)

$$\frac{V}{a + b + c + d + e + f}$$

et dans le fil AM, elle vaut

$$\frac{V(a + b + c + d)}{a + b + c + d + e + f)} \tag{1}$$

2° dans la seconde dérivation, la résistance totale est

$$R + a + b + c + d + e + f + x$$

La chute par unité de résistance a pour valeur

$$\frac{V}{R + a + b + c + d + e + f + x}$$

et, dans la partie AEM' elle est

$$\frac{V(R + a + b + c + d)}{R + a + b + c + d + e + f + x} \tag{2}$$

Egalons les deux différences de niveau calculées en (1) et en (2)

$$\frac{V(a + b + c + d)}{a + b + c + d + e + f} = \frac{V(R + a + b + c + d)}{R + a + b + c + d + e + f + x}$$

ou

$$\frac{a + b + c + d}{a + b + c + d + R} = \frac{a + b + c + d + e + f}{R + a + b + c + d + e + f + x}$$

Appliquons une propriété connue des proportions

$$\frac{a+b+c+d}{R} = \frac{a+b+c+d+e+f}{R+x}$$

ou

$$\frac{R+x}{R} = \frac{a+b+c+d+e+f}{a+b+c+d}$$

Appliquant la même propriété que précédemment, nous trouvons

(3)
$$\frac{x}{R} = \frac{e+f}{a+b+c+d} = \frac{a+b}{a+b+c+d}$$

Or, il existe entre les valeurs des résistances a, b, c, d, e et f, les relations suivantes :

1° $a=f;\ b=e;\ c=d;$

2° La résistance a est la $\frac{1}{100}$ partie de la somme des cinq autres :

$$a = \frac{b+c+d+e+f}{100} = \frac{a+b+c+d+e}{100}$$

3° Les deux premières réunies, $a+b$ valent le $\frac{1}{10}$ de la somme des quatre autres :

$$a+b = \frac{c+d+e+f}{10} = \frac{a+b+c+d}{10}$$

Nous voyons donc que, par construction, le second membre de l'équation (3) vaut $\frac{1}{10}$; il en résulte que l'on a

(3')
$$\frac{x}{R} = \frac{1}{10}$$

et

$$x = \frac{R}{10}$$

Sur la ligne de jonction MM' on a marqué le chiffre 1/10; il indique que les valeurs trouvées pour R doivent être divisées par 10 pour donner x; de même en NN' est marqué $\frac{1}{100}$ $(x = \frac{R}{100})$ en HH' se lit le chiffre 1 (dans ce cas $x=R$). LL' correspond à 10 ($x=10$ R) et KK' à 100 ($x=100$ R). On placera donc, avant chaque expérience, le galvanomètre suivant la position la plus convenable : vers NN' s'il s'agit de mesurer de très faibles résistances, vers KK' s'il s'agit au contraire de valeurs moins petites. On remarque que la résistance des contacts ne peut en aucune façon influer sur les résultats, car elle est négligeable à côté de celle des bobines en série avec ces connexions.

Un des modèles les plus répandus est celui de M. Carpentier. La figure 305 représente cet instrument avec les connexions qu'il comporte; on y remarque quatre groupes de deux bornes :

1° Le premier marqué *courant* est relié aux extrémités du conducteur AB sur lequel on doit prendre un segment CD pour en déterminer la résistance.

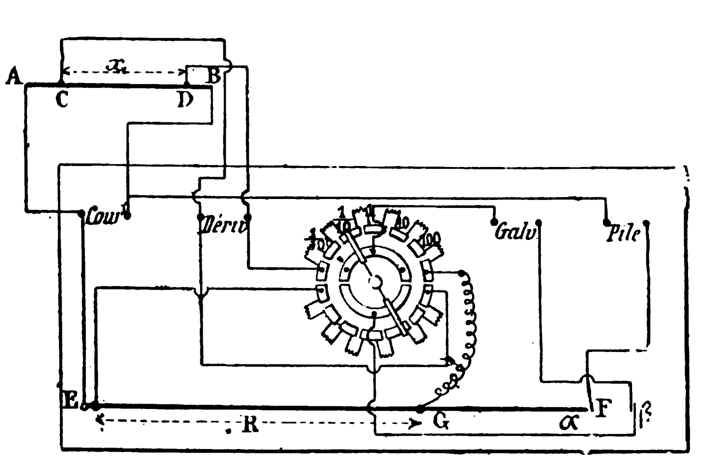


Fig. 305.

2° Ce segment CD est réuni, par ses extrémités, aux deux bornes suivantes marquées *dérivation.*

3° et 4° Les deux derniers groupes sont indiqués respectivement, *galvanomètre* et *pile*.

Le distributeur, destiné à mettre le galvanomètre dans la position voulue, est formé de deux couronnes concentriques en cuivre : l'extérieure est partagée en quatorze plots entre lesquels sont placées, comme l'indique la figure, les douze bobines. La couronne intérieure est partagée en deux parties seulement réunies chacune à l'une des bornes du galvanomètre. Un double contact permet de faire communiquer ces demi-couronnes aux plots voulus et devant chacune des cinq positions possibles, sont indiqués les rapports $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{10}$, 1, 10 et 100.

Le fil calibré est EF et le contact glissant est en G; une règle parallèle à EF marque exactement les résistances R, soit EG introduites dans chaque expérience. Enfin deux clefs α et β sont destinées à établir les circuits de la source et du galvanomètre. On peut suivre aisément, sur la figure 305, les trois circuits ABCD, AHD et AEH'FD de la figure 304.



Fig. 306.

On voit (fig. 306) l'ensemble du pont de Kelvin, modèle Carpentier.

Voici maintenant comment on emploie cet instrument, et d'abord indiquons quelles sont les résistances mesurables.

La tige de maillechort a une résistance totale de $\frac{1}{100}$ d'ohm; en employant le rapport 100, on peut donc mesurer une résistance maxima de

$$\frac{1}{100} \times 100 = 1 \text{ ohm.}$$

Ce conducteur est divisé en 100 parties égales valant chacune par conséquent

$$\frac{1}{100} \times \frac{1}{100} = \frac{1}{10.000} \text{ ohm}$$

Avec le rapport $\frac{1}{100}$, on peut donc évaluer une résistance minima de

$$\frac{1}{10.000} \times \frac{1}{100} = \frac{1}{1.000.000} \text{ ohm.}$$

Telles sont donc les deux limites supérieure et inférieure d'application de la méthode.

Le montage s'effectue conformément au schéma en faisant usage comme source de 5 éléments d'accumulateurs capables de débiter facilement une dizaine d'ampères.

Si nous n'avons aucune donnée sur la valeur de l'inconnue, nous mettrons le double contact du distributeur sur le plot 1 et nous effectuerons un premier essai comme suit :

1° Placer le curseur vers l'une des extrémités de la tige calibrée;

2° Fermer le courant par la clef α;

3° Etablir aussitôt le circuit du galvanomètre par β;

4° Noter le sens de la déviation galvanométrique;

5° Lever d'abord la clef du galvanomètre puis celle de la source d'électricité.

On fait ensuite un nouvel essai semblable mais en portant, dans la manœuvre 1) le curseur vers l'extrémité opposée à celle de la première opération. Si, dans ce cas, la déviation est contraire à la première, il n'y a pas à toucher au double contact du distributeur. Si, au contraire, on a dans les deux tâtonnements le même sens de déviation, il faut modifier la position du double contact jusqu'à arriver au résultat indiqué. Supposons que nous y soyons parvenus; nous savons que, pour une position du curseur intermédiaire aux deux positions extrêmes, nous devons annuler l'écart du galvanomètre. Nous pouvons alors opérer une série de tâtonnements, tous conformes au programme ci-dessus, et resserrer, comme nous l'avons vu à propos du pont à fil (page 302) l'intervalle comprenant la valeur de R cherchée. Une simple multiplication par le facteur marqué sur le distributeur donne la résistance inconnue x.

4° **Méthode de l'ampèremètre et du voltmètre**. — Cette nouvelle méthode s'applique à des valeurs moyennes; elle est très utile quand il s'agit de la résistance présentée par un conducteur en service, une lampe à incandescence à chaud, une partie de dynamo, etc. On fait passer le courant d'une source quelconque à travers le



conducteur en question et on relève, à l'ampèremètre, l'intensité obtenue. En même temps on note, sur un voltmètre, la chute de potentiel produite dans le conducteur étudié. La loi d'Ohm nous indique que l'intensité est le quotient de la différence de niveau par la résistance

$$I = \frac{E}{R}$$

nous en tirons

$$R = \frac{E}{I}$$

Il suffit donc de diviser le nombre de volts par le nombre d'ampères : on obtient la résistance en *ohms*.

5° Ohmmètres. — Ce sont des appareils donnant, par une simple lecture, la valeur d'une résistance en ohms.

L'un de ces appareils est constitué par la combinaison d'un ampèremètre et d'un voltmètre; il comprend deux bobines à angle droit et, dans la partie centrale, une aiguille aimantée mobile qui doit se tenir en équilibre suivant l'axe d'un multiplicateur. Cette bobine A est à gros fil et on lui envoie par l'intermédiaire de la résistance inconnue, le courant d'une source S à voltage suffisant. Entre les deux extrémités *a* et *b* de la résistance est installée la seconde bobine B, celle-ci à fil long et fin ; elle est le siège d'un courant d'intensité proportionnelle à la différence de potentiel E de *a* et de *b* ; sous cette influence l'aimant tend à tourner de 90° et cela en vertu d'une force KE (fig. 308). De la part de l'autre enroulement, l'aiguille est sollicitée par une force K'I. Ces deux forces concourantes admettent une résultante soit R ; sa direction détermine celle de l'aimant mobile. Dans le triangle N'RK'I, nous avons

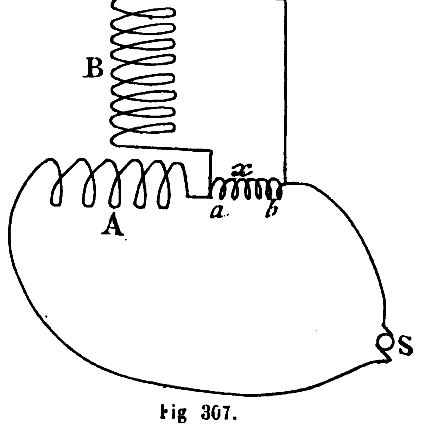


Fig 307.

$$KE = K'I \operatorname{tg} \alpha$$

nous tirons de là

$$R = \frac{E}{I} = \frac{K'}{K} \operatorname{tg} \alpha$$

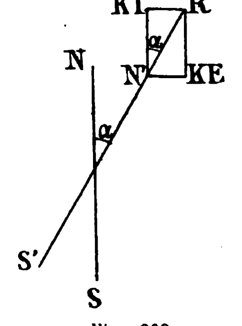


Fig. 308.

Ainsi en supposant K et K' constants, nous voyons que la résistance interposée est proportionnelle à la tangente de la déviation.

D'une façon exacte nous pouvons dire que l'angle α croît avec la résistance R et il est possible de graduer l'instrument en ohms. Pour faire servir l'appareil entre des

limites très étendues de R, on introduit des résistances convenables en série avec la bobine voltmétrique.

Ohmmètre Carpentier. — M. Carpentier a utilisé la disposition du galvanomètre à circuit mobile ; cet appareil comprend (fig. 309) une série d'aimants puissants disposés horizontalement et présentant des pièces polaires entre lesquelles se meut l'équipage mobile. Celui-ci est formé de deux bobines solidaires et à angle droit ; deux noyaux en fer doux occupent les parties centrales de ces deux enroulements; elles ont pour but de compléter le champ magnétique, comme dans le galvanomètre Deprez-d'Arsonval. Le courant nécessaire à la mesure est fourni par une petite machine magnéto; il arrive à l'ohmmètre et s'y bifurque :

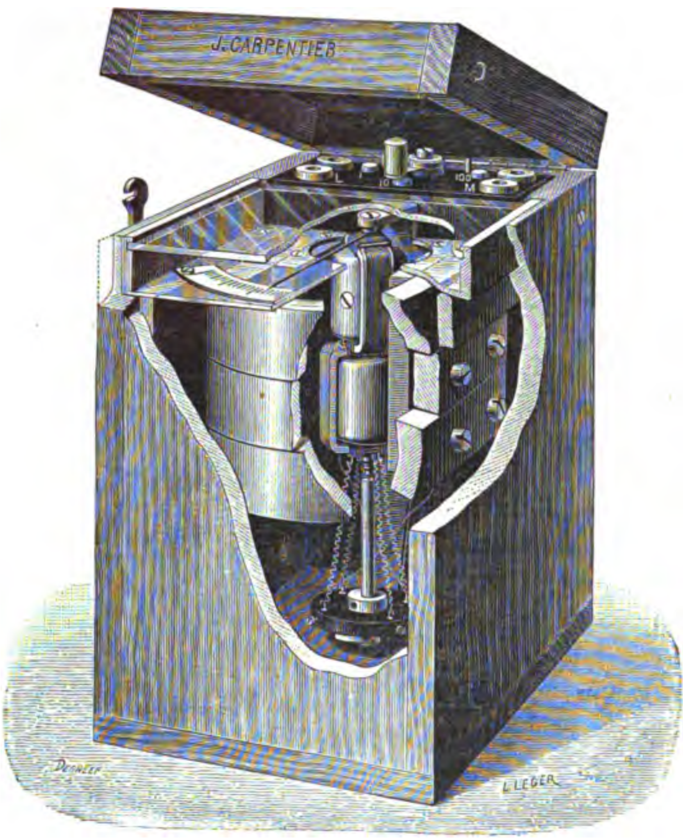


Fig. 309.

1° Une partie passe dans l'un des cadres muni d'une résistance fixe ;

2° L'autre portion se rend au deuxième circuit comprenant, en série avec le second cadre mobile, la résistance inconnue.

Les deux circuits sont, comme l'on voit, en dérivation l'un par rapport à l'autre et les courants sont amenés aux enroulements par trois fils très fins et très longs enroulés de manière à annuler, *autant que possible*, leur élasticité et par suite leur action directrice. L'existence de ces fils *légèrement directeurs* explique un fait qui frappe quand on fait usage de cet ohmmètre : en l'absence de courant, l'index entraîné par la partie mobile se porte vers l'extrémité du cadran marqué : *résistance infinie*. Dès que le courant de la machine (100 volts au moins) circule dans les fils, la force élastique devient négligeable vis-à-vis des efforts électro-magnétiques et l'ensemble se fixe dans une position déterminée qui dépend de la résistance interposée.

Les connexions sont nettement indiquées sur l'appareil de sorte qu'il n'y a aucune erreur possible.

Cet appareil est d'ailleurs à sensibilité variable ; on voit, en effet, à sa partie supérieure, trois bornes marquées 1, 10, 100 sur lesquelles peut prendre contact une manette qui introduit ainsi un réducteur dans le circuit : le cadran de l'ohmmètre est gradué de 0 à 50 000 ohms. Ces chiffres représentent les résistances inconnues quand la manivelle est sur le plot 1. Si nous changeons de sensibilité, nous devons multiplier les chiffres lus par les nombres indiqués près des plots, soit 10 ou 100. L'appareil est donc gradué de 0 à 5 mégohms.

Ohmmètre Chauvin et Arnoux. — Cet appareil réalise la disposition d'une sorte de pont de Wheatstone ; il comprend (fig. 310) :

1° Un rhéostat *ab*, enroulé sur un axe isolant, que l'on peut partager en deux parties *a* et *b* par le curseur C mobile devant une règle graduée ;

2° La résistance inconnue *x* et un groupe de cinq bobines formant des résistances respectivement égales à 10, 100, 1.000, 10.000 et 100.000 fermant le circuit des deux résistances prises sur le rhéostat ;

3° Le galvanomètre *g*, à cadre mobile et à suspension par ressort à boudin, disposé comme dans le pont de Wheatstone. Son index est mobile derrière une lentille destinée à amplifier les écarts et à faciliter la réduction à zéro ; un repère

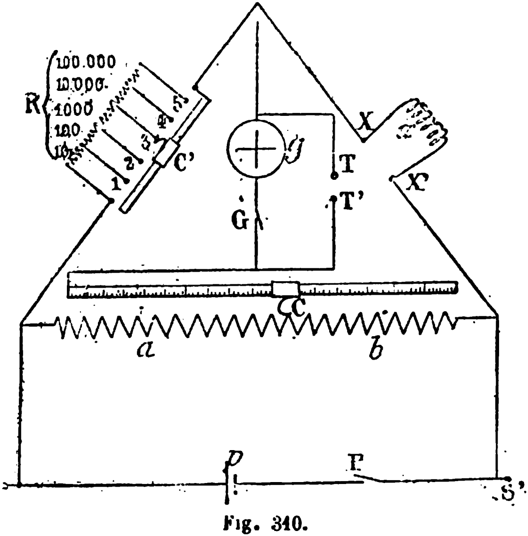


Fig. 310.



Fig. 311.

marque la position d'équilibre de l'équipage et un bouton O (fig. 311) permet de remettre, avant chaque expérience, l'index dans cette situation ;



4° La source électrique nécessaire est en p ; on la met en service au moyen d'une clef P ; ordinairement il est fait usage d'une série d'éléments à liquide immobilisé située dans une boîte attenante à l'ohmmètre. Au lieu de cette source, on peut employer le courant secondaire d'une bobine de Ruhmkorff que l'on relie aux points marqués S et S' sur les figures 310 et 311. Alors le galvanomètre doit être remplacé par un récepteur téléphonique qui vient s'attacher aux bornes T et T'.

Les connexions étant établies comme il vient d'être indiqué, voici comment on effectue une mesure de résistance au moyen de cet instrument :

1) Placer le curseur C' sur un plot 1, 2, 3, 4 ou 5 de manière à rendre cette résistance R autant que possible du même ordre de grandeur que x.

2) Mettre le curseur C vers le milieu de la règle (position de la fig. 310).

3) Appuyer d'abord sur le bouton P puis, en maintenant le premier contact, sur G. Regarder le galvanomètre.

4) Ordinairement le galvanomètre ne reste pas au zéro et du côté où il dévie, une flèche tracée sur le cadran indique dans quel sens il faut pousser *les deux* curseurs C et C' pour réduire la déviation à zéro. On effectue ce mouvement sur C *seulement*, après avoir abandonné les deux boutons G et P à eux-mêmes et on continue les essais en agissant sur ces deux contacts, pour les nouvelles positions données à C.

5) Deux cas se présentent maintenant :

a) Après une série de tâtonnements, au moyen du mouvement de C seul, on arrive à équilibrer le galvanomètre sans être obligé d'amener C *vers* l'une des extrémités de sa règle. L'opération est alors terminée : la position de C' était convenable et on lit la division de la règle correspondant à C, soit 127, par exemple. Si C' est sur le plot 3 fig. 310), position correspondant à R = 1.000 ohms, nous aurons pour x :

$$x = 1{,}27 \times 1.000 = 1.270$$

Règle pratique : reculer la virgule du chiffre lu d'autant de rangs vers la droite que l'indique la position de C' (en ajoutant autant de zéros que cela est nécessaire).

b) Supposons que nous ne puissions ramener le galvanomètre au zéro sans reculer C jusqu'à l'une des extrémités de sa course : nous devons alors agir sur C', toujours dans le sens marqué par la flèche du galvanomètre et recommencer les tâtonnements jusqu'à obtenir la réduction à zéro.

Les mesures possibles avec cet ohmmètre sont très étendues : de $\frac{1}{10}$ ohm à 20 mégohms. On peut évaluer aussi la résistance des électrolytes en ayant soin de substituer au courant continu, celui d'une bobine de Ruhmkorff, comme on l'a indiqué.

Mesure de la résistance d'isolement. — On appelle *résistance d'isolement* d'une canalisation la résistance mesurée entre le conducteur et la terre. Si l'isolement était parfait, cette résistance s'exprimerait par l'infini ; si, au contraire, un point du fil était à la terre, on trouverait zéro. Entre ces limites, la résistance d'iso-



lement est en *raison inverse* de la longueur de la ligne (On peut remarquer, en effet, que la surface latérale du fil et par suite la section de ce conducteur anormal que constitue l'isolant varie comme cette longueur).

La résistance d'isolement s'exprime ordinairement en mégohms-kilomètre et ce chiffre doit bien entendu être d'autant plus considérable que les fils ont une plus grande longueur si on veut que l'isolement général soit suffisant.

Bien des méthodes peuvent être employées pour cette mesure ; elles varient d'ailleurs avec la nature de l'isolement cherché ; on peut, en effet, se proposer de trouver seulement l'isolement d'un câble non posé ou de mesurer celui d'une canalisation existante. Nous aurons uniquement en vue ici le cas d'un câble. Alors on fait usage souvent de la méthode de substitution (voir page 297).

Soit donc un câble ab ; on l'immerge dans un bac plein d'eau et on relie l'une de ses extrémités (a) au pôle négatif d'une pile p d'un grand nombre d'éléments par l'intermédiaire du galvanomètre G ; le pôle + de la même source est réuni à l'eau du baquet tandis que la seconde extrémité du câble est isolée, en b [1]. Par l'emploi du petit commutateur C, le circuit est fermé et l'on observe les déviations du galvanomètre en fonction du temps écoulé. Soit α cet écart à un moment donné, le shunt employé ayant un pouvoir multiplicateur m ; si E est la f.é.m. de la source et R la résistance d'isolement du câble entier, nous obtenons un courant i tel que

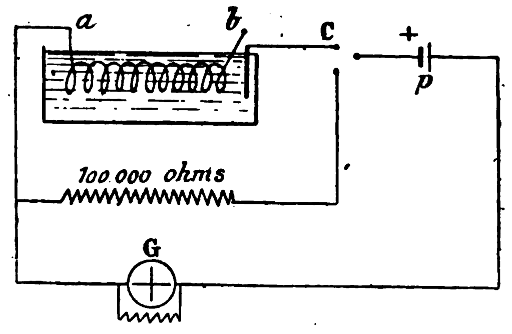


Fig. 312.

$$i = \frac{E}{R}$$

Or i s'exprime par

$$i = Km\alpha$$

K étant la constante de l'appareil de mesure. On a donc

$$Km\alpha = \frac{E}{R}$$

d'où

$$R = \frac{E}{Km\alpha}$$

Nous pouvons d'ailleurs passer de R résistance totale à R_1 résistance par kilomètre ; en effet, l étant la longueur du câble on a

$$R_1 = R \times l$$

(1). Si on opérait autrement (pôle + au câble), l'électrolyse pourrait oxyder l'âme du câble aux points faibles de l'isolant et le défaut s'atténuerait, alors qu'il s'agit de déceler les moindres imperfections du conducteur.

d'où

(1) $$R_1 = \frac{E l}{K m \alpha}$$

On substitue ensuite au câble, par le jeu de C, une résistance connue, aussi forte que possible, 100 000 ohms, par exemple. On obtient, si l'on change en E' la f. é. m. de la source, un courant

$$i' = \frac{E'}{100.000}$$

qui donne une déviation α' de la partie mobile pour un shunt de pouvoir m'. Il vient donc

$$i' = \frac{E'}{100.000} = m'K\alpha'$$

d'où

(2) $$100.000 = \frac{E'}{m'K\alpha'}$$

Comparant (1) et (2) nous obtenons

$$\frac{R_1}{100.000} = \frac{E}{E'} \times \frac{m'}{m} \times \frac{\alpha'}{\alpha} l$$

d'où

$$R_1 = 100.000 \times \frac{E}{E'} \times \frac{m'}{m} \times \frac{\alpha'}{\alpha} \times l \text{ ohms}$$

Si l'on exprime l en kilomètres ou en fraction de kilomètre, nous pouvons écrire

$$R_1 = \frac{E}{E'} \times \frac{m'}{m} \times \frac{\alpha'}{\alpha} \times \frac{l}{10} \text{ mégohms-kilomètre}$$

Si l'expérience doit être répétée, il est bien entendu indispensable de décharger le câble avant toute nouvelle opération.

Mesure de la résistivité d'un conducteur. — La formule qui donne la résistance R d'une longueur l du conducteur de section s est

$$R = r \frac{l}{s}$$

r représentant la résistivité du métal. Nous tirons de là

$$r = \frac{Rs}{l}$$

L'opération revient donc à chercher la résistance R, la section s et la longueur l.

On peut employer pour cette mesure la méthode du pont de Wheatstone ou mieux celle du pont de Kelvin. Si le fil ou le câble a été pris entre deux couteaux à une distance parfaitement connue, nous possédons deux éléments déjà : R et l ; il reste à

déterminer s et pour cela on peut adopter des procédés divers. Avant tout on dénude le fil soit mécaniquement soit par attaque chimique de l'isolant. Puis on fait usage du palmer ou bien on pèse une portion connue du fil, dont la densité est donnée ; la section est, dans les deux cas, facilement calculée. Il faut généralement faire une correction due à la variation de température ; on sait, en effet, que la valeur r est fonction de la température t et l'on a, si r_0 est la résistivité à zéro degré

$$r = r_0 (1 + at)$$

Le cuivre pur recuit de Matthiessen a longtemps été considéré comme l'idéal des conducteurs. Sa résistivité pour une longueur d'un centimètre et une section d'un centimètre carré est de

1,584 microhm à 0°

ce qu'on exprime par

$$r_0 = 1,584 \text{ microhm} - \text{cm}$$

Actuellement on trouve des cuivres supérieurs comme conductivité, c'est-à-dire inférieurs comme résistivité à ce type Matthiessen.

CHAPITRE VI

MESURE DE LA CAPACITÉ ÉLECTRIQUE

Etalons de capacité. — L'unité adoptée est le *farad*, capacité du conducteur se chargeant par un coulomb, au potentiel d'un volt. Cette unité est très considérable. C'est celle d'une sphère isolée de rayon égal à 9 millions de kilomètres.

On se trouve obligé de fractionner cette unité et d'adopter le *microfarad*, millionième partie du farad. C'est encore une unité fort considérable puisqu'elle représente la capacité d'une boule conductrice isolée de 9 kilomètres de rayon. Pour réaliser cet étalon, on ne peut évidemment pas songer à un simple *conducteur*; on se sert de *condensateurs* formés de feuilles d'étain séparées les unes des autres par des isolants, papier paraffiné ordinairement. La figure 313 indique la disposition des armatures : on met une feuille métallique ayant son coin droit coupé, soit 1 ; au-dessus une feuille de papier 2 laissant apparaître le coin de 1, puis une deuxième feuille d'étain 3 dont l'angle gauche est abattu et ainsi de suite. A droite apparaissent donc les angles de toutes les lames prises de deux en deux; à gauche ceux des feuilles intermédiaires. Tous les premiers communiquent, les autres également et constituent par leur ensemble les deux armatures du condensateur. Le tout est noyé dans de la paraffine.

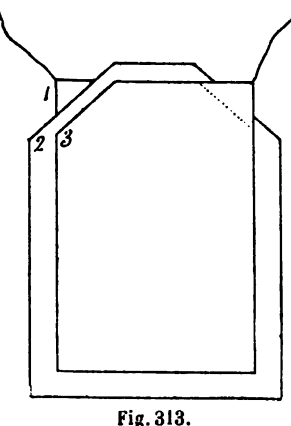


Fig. 313.

On a remplacé, dans les modèles de précision, le papier paraffiné par des lames de mica.

M. Bouty a fait des étalons en mica argenté sur une face; l'argenture tient alors lieu d'armatures.

Souvent le microfarad est subdivisé, soit en dixièmes, soit en quatre parties inégales valant chacune :

$$\frac{1}{10} \quad \frac{2}{10} \quad \frac{2}{10} \quad \frac{5}{10}$$

de l'ensemble. De cette façon, en associant convenablement les parties, on arrive à former toutes les capacités de 0,1 à 1 microfarad, par dixièmes.

Voici comment est établi l'étalon de la maison Carpentier : les quatre segments sont logés dans une boite circulaire dont le couvercle, en matière isolante, porte un disque central, un anneau et quatre pièces séparées comprises entre le disque et l'anneau. La partie centrale communique avec une armature de chaque condensateur partiel (fig. 314). Les quatre autres armatures sont reliées respectivement aux quatre plots de cuivre. Enfin, des chevilles métalliques permettent de faire communiquer chacun de ces plots, soit avec le centre, soit avec l'anneau. Si la cheville est à la périphérie, la portion correspondante du microfarad est en service, car les bornes du condensateur sont en A et en B; le transport de la broche au centre supprime, au contraire, le segment. La figure indique, par conséquent, une capacité de 0,6 microfarad.

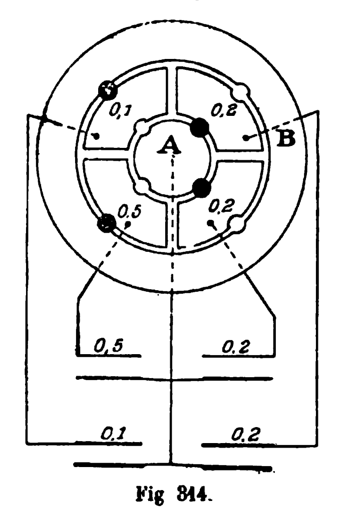


Fig 314.

Mesure d'une capacité. — La méthode la plus simple consiste à opérer par comparaison. Le condensateur à étudier se place en C, entre une clef de charge et de décharge I, et un galvanomètre balistique GB (fig. 315). On opère d'abord la charge en mettant le levier mobile dans la position figurée; théoriquement la charge devrait être instantanée, mais pratiquement il n'en est pas toujours ainsi et il est bon de prolonger cette opération pendant un temps égal dans toutes les expériences, soit de une minute par exemple. Soit x la capacité du condensateur; soit e la f. é. m. de la source P; la charge de C s'exprime par

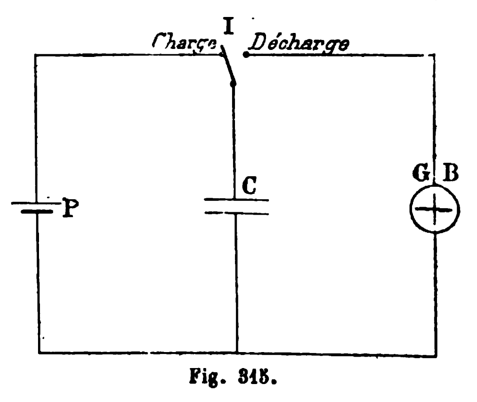


Fig. 315.

(1) $$q = x e$$

On passe ensuite à la décharge; il suffit pour cela de changer la position de la clef I. Le galvanomètre accuse alors une impulsion α qui correspond à la quantité q d'électricité.

(2) $$q = K\alpha$$

Égalons les deux expressions de q tirées de (1) et de (2); il vient

(3) $$q = xe = K\alpha$$

On recommence ensuite les mêmes opérations au moyen d'un étalon de capacité mis

en C ; une déviation α' correspond à une quantité q' d'électricité et l'on peut écrire, si C est la capacité de cet étalon

$$(4) \qquad q' = Ce = K\alpha'$$

On a donc par comparaison des deux équations (3) et (4)

$$\frac{xe}{Ce} = \frac{K\alpha}{K\alpha'}$$

ou

$$\frac{x}{C} = \frac{\alpha}{\alpha'}$$

Si en particulier C = 1 microfarad, il vient

$$x = \frac{\alpha}{\alpha'} \text{ microfarads.}$$

CHAPITRE VII

MESURE DE LA PUISSANCE ET DE L'ENERGIE ELECTRIQUES

Unités. — Pour évaluer une puissance on emploie le *watt* ou *l'hectowatt* et le *kilowatt ;* pour une énergie, on utilise le *joule* (un joule = un *watt-seconde*) ou encore le *watt-heure* ; on a alors

$$1 \text{ watt-heure} = 3.600 \text{ joules}$$

On fait aussi usage de *l'hectowatt-heure* et du *kilowatt-heure* (appelés souvent, dans la pratique, improprement l'*hectowatt* et le *kilowatt*).

Appareils de mesure. — Ils dépendent de la nature de l'opération à effectuer.

Si l'on veut à chaque instant connaître la puissance demandée à la canalisation, on fait usage de *wattmètres*.

Pour totaliser l'énergie absorbée, on se sert de *compteurs d'énergie*, encore appelés *joule-mètres* ou *wat-heure-mètres*.

A la rigueur, on pourrait se passer de wattmètres, puisque l'ampèremètre et le voltmètre donnent des indications i et e dont le produit, dans le cas de courant continu, égale la puissance.

Wattmètre Siemens. — Cet appareil n'est qu'une modification de l'électrodynamomètre de même nom. Il comprend deux enroulements à 90 degrés l'un de l'autre; la partie fixe a seulement quelques spires; elle livre passage au courant principal et doit présenter une résistance très faible; la bobine mobile est à fil plus fin; elle est reliée à un fil très résistant R et l'ensemble est branché sur le circuit entre les points a et c.

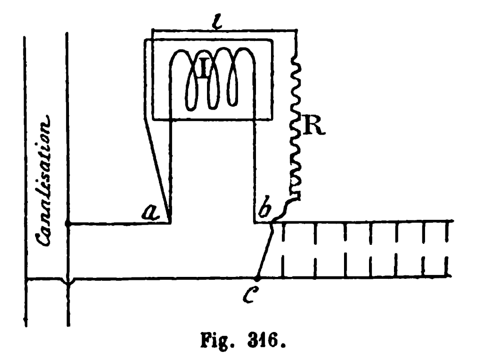


Fig. 316.

Dans la partie fixe, l'intensité a pour valeur I courant demandé par tous les appareils réunis; dans la bobine mobile, nous avons un courant d'intensité i donnée par le quotient de la différence de potentiel des points a et c par la résistance totale $\mathfrak{R}$ de la dérivation. On a donc

$$i = \frac{E}{\mathfrak{R}}$$

D'après cela, le couple déviant est proportionnel au produit $I \times i$, comme dans l'électrodynanomètre, soit

$$K \frac{EI}{\mathfrak{R}}$$

Or $\mathfrak{R}$ est une quantité constante; il en est de même de K; donc on peut écrire, puisque EI est la puissance consommée, que le couple a pour valeur

$$KP$$

Si cet effort a pour effet d'entraîner la partie mobile en tordant un fil de suspension, on peut écrire que la puissance P est proportionnelle à la rotation α

$$P = C\alpha$$

Dans le wattmètre Siemens, on ramène le cadre mobile au zéro par une torsion convenable de la suspension et l'équation précédente s'applique identiquement.

Un électro-dynamomètre peut, en général, se transformer en wattmètre, il suffit pour cela d'ajouter une résistance considérable au circuit à fil fin qui reçoit alors le courant dérivé sur les appareils d'utilisation. Le modèle Carpentier (dont il est parlé page 266) se prête très bien à cette transformation. Les seules précautions particulières à cet emploi spécial de l'instrument sont :

1° Le montage de la bobine mobile en dérivation sur le circuit d'utilisation;

2° L'interposition d'une résistance considérable sur ce circuit dérivé;

3° La puissance cherchée est *proportionnelle* à la torsion exercée pour ramener le cadre à sa position primitive.

Compteur Aron. — Il est basé sur le même principe que le compteur de quantité déjà décrit (page 271) et a pour but de totaliser l'énergie consommée pendant un temps déterminé. Appelons P la puissance absorbée à un moment donné; l'énergie correspondant à un temps infiniment petit dt, pris à partir de cet instant, est

$$P\,dt$$

et pendant le temps T, elle vaut

$$W = \int_0^T P\,dt$$

L'appareil doit donc comprendre un wattmètre et un intégrateur; il se compose de deux mouvements d'horlogerie distincts munis de balanciers terminés par des bobines recevant un courant dérivé sur les appareils d'utilisation. Deux autres bobines fixes,



à gros fil, sont au devant des premières et livrent passage au courant principal.

Les deux roues d'échappement sont en relation avec un train d'engrenages différentiels et si les deux mouvements sont synchrones, la roue planétaire reste fixe; cette roue tourne au contraire si les vitesses sont inégales.

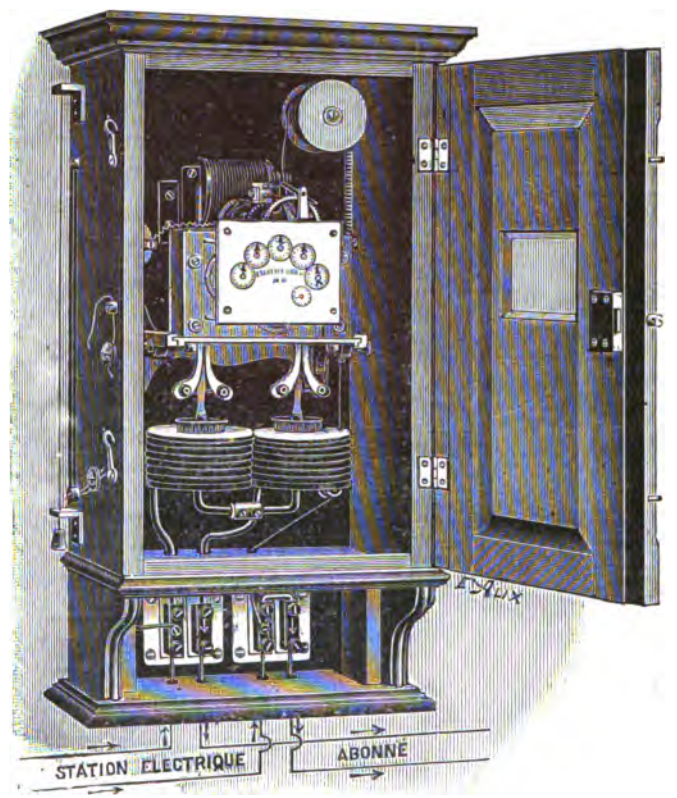


Fig. 317.

Supposons les appareils d'utilisation non en service; les bobines à gros fil ne sont traversées par aucun courant; les longueurs des deux pendules sont réglées pour le synchronisme parfait et le planétaire reste au repos.

Quant au contraire le courant est utilisé, il passe dans les enroulements à gros fil et agit sur le battement des pendules :

a) Une attraction (par deux courants de même sens) entre les deux bobines, fixe et mobile, correspondantes accélère le mouvement;

b) Une répulsion (courants opposés), retarde au contraire les oscillations.

Or, les connexions sont faites de manière à accélérer le mouvement de l'un et à retarder celui de l'autre; il en résulte une rotation amplifiée de la minuterie du compteur. Cette rotation est, à chaque instant, proportionnelle à la puissance absorbée; le nombre total de tours des aiguilles est donc aussi finalement proportionnel à l'énergie consommée.

Le remontage des barillets se fait tous les mois environ.

Les compteurs nouveaux (fig. 317) sont à remontage *électro-automatique*; la longueur des pendules est alors notablement diminuée (ce qui rend l'appareil moins encombrant) et on ne cherche plus à obtenir un synchronisme parfait entre les deux balanciers (ce qui serait difficile d'ailleurs, étant donnée la grande rapidité des oscillations). Le remontage, qui a lieu toutes les 20 secondes environ par le courant lui-même, renverse chaque fois le sens de l'électricité dans les deux bobines mobiles tout en conservant au compteur un même sens de rotation; il en résulte ainsi une correction de l'erreur qui pourrait provenir d'un défaut de réglage.

Ce renversement continuel met l'appareil à l'abri de la fraude et des perturbations de causes extérieures.

Ajoutons que la consommation d'énergie de ce compteur, remontage compris, est très faible.

Compteur Elihu Thomson. — Il se compose de trois parties essentielles : un *moteur électrique*, un *frein* et un *compteur de tours* :

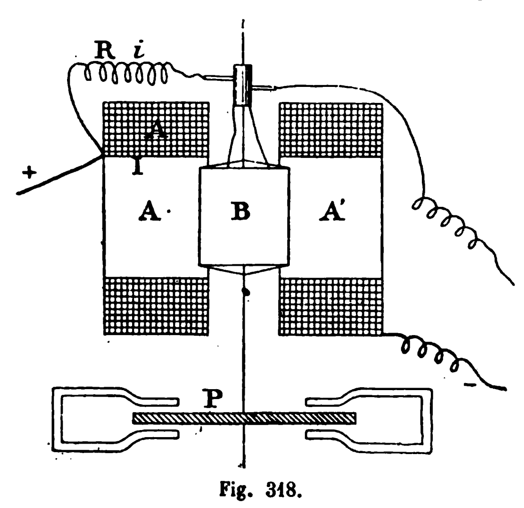
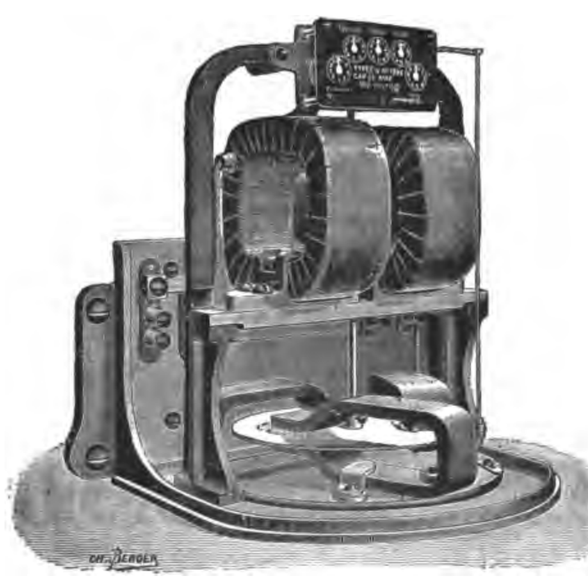


Fig. 318.

1° Le *moteur* (fig. 318), consiste en deux bobines fixes, à gros fils A et A' recevant le courant principal, et en un petit tambour B, disposé dans le champ des bobines, et recevant, au moyen d'un collecteur Gramme, le courant dérivé sur la distribution. Ce courant traverse d'ailleurs la résistance considérable R. Cet ensemble constitue par conséquent une sorte de wattmètre et le couple agissant est proportionnel, à chaque instant, à la puissance absorbée ;

2° Le *frein* est destiné à s'opposer au couple moteur ; il est constitué par un plateau de cuivre P solidaire du tambour B et tournant entre les pôles de deux ou de trois aimants permanents. Les courants de Foucault, développés par la rotation, s'opposent au mouvement et représentent, pour chaque tour, un travail résistant déterminé, proportionnel à l'énergie électrique prise à la distribution pendant la durée de cette rotation ; il en résulte donc que l'énergie totale consommée est proportionnelle au nombre de tours du système mobile ;


Fig. 319.

3° Le *compteur de tours* est entraîné par l'arbre de rotation ; il comprend un certain nombre de mobiles marquant sur des cadrans correspondants les unités, les dizaines etc. d'hectowatts-heure ou de kilowatts-heure suivant les cas.

La figure 319 représente l'ensemble de l'appareil.

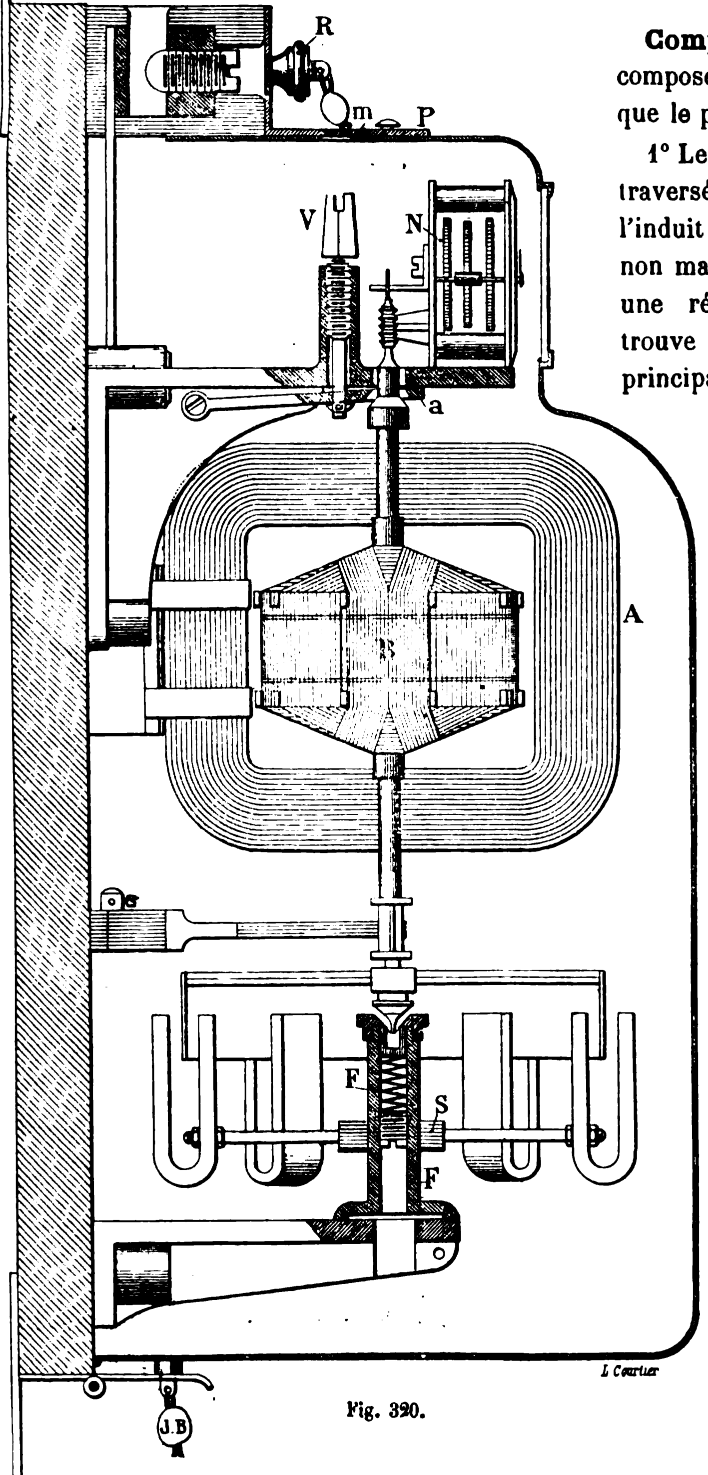


Fig. 320.

Compteur Vulcain. — Il se compose des trois mêmes parties que le précédent :

1° Le *moteur*; son inducteur est traversé par le courant principal; l'induit bobiné sur une carcasse non magnétique, et en série avec une résistance considérable, se trouve dérivé sur les conducteurs principaux; il reçoit le courant par l'intermédiaire de balais longs en fils d'argent et d'un collecteur dont les touches sont aussi en argent et par suite inoxydables. L'arbre qui porte cet induit tourne dans des crapaudines en pierre fine suspendues d'une manière élastique de façon à assurer un serrage convenable sur les pointes d'acier;

2° Le *frein* porté par l'arbre mobile est un anneau de cuivre tournant entre les pôles de douze aimants en fer à cheval et fixes. On peut à volonté faire monter ou descendre l'ensemble de ces aimants et modifier ainsi le couple résistant. Le grand nombre et la disposition de ces aimants réduisent autant qu'on le peut les chances de variation du couple de freinage et par suite les modifications de l'étalonnage;

3° *Compteur*. Le pignon de commande a un nombre de dents tel que

l'aiguille du cadran des unités marque directement les hectowatts-heure dépensés.

La figure 321 montre l'ensemble d'un compteur Vulcain construit par la *Compagnie continentale pour la fabrication des compteurs*. A cet appareil électrique peut

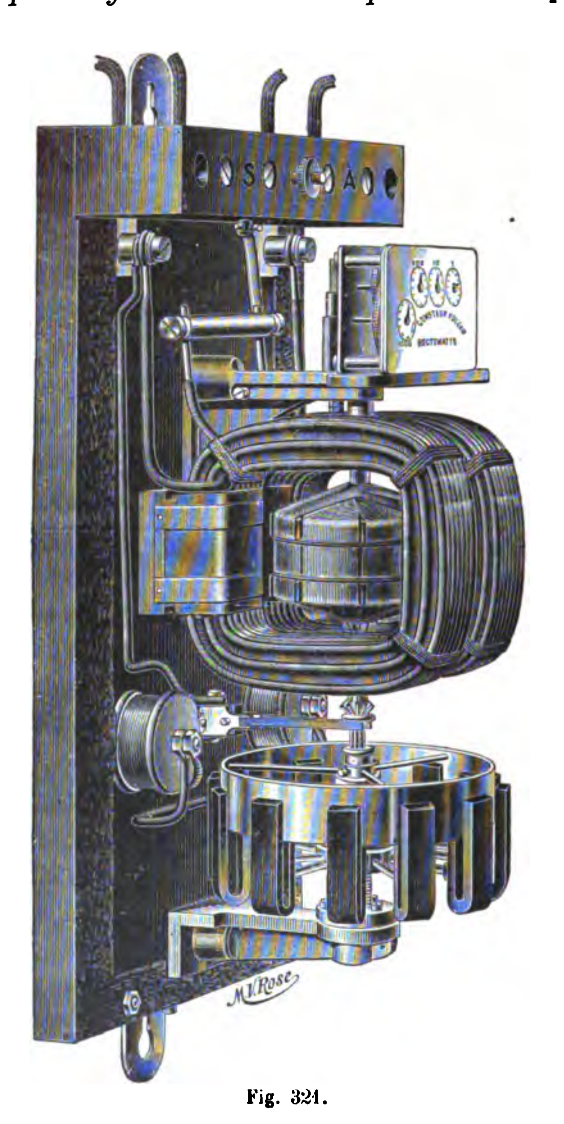


Fig. 321.

être adaptée une disposition analogue à celle que l'on trouve dans certains compteurs à gaz à *paiement préalable*. Il en résulte que l'abonné d'une station centrale d'électricité peut, par ce dispositif, déposer dans son compteur une somme déterminée; le courant lui est alors distribué jusqu'à concurrence de la somme versée.

CHAPITRE VIII

MESURES MAGNÉTIQUES

Leur objet. — Nous classerons sous ce titre diverses mesures d'une grande importance : intensité d'un champ et étude des propriétés magnétiques du fer et des métaux constitutifs des machines ou des transformateurs. Ces propriétés sont au nombre de deux : 1° la perméabilité ; 2° l'hystérésis.

La perméabilité ne nous est, en effet, donnée par les tables que pour le fer pur. Or, le métal marchand n'est jamais dans ces conditions; les moindres impuretés suffisent à altérer notablement les qualités du corps magnétique.

L'étude directe de la perméabilité des fers employés est donc toujours indispensable; on ne doit pas négliger l'hystérésis toutes les fois que le métal doit servir de noyau à une bobine traversée par des courants alternatifs (tranformateurs, induits des dynamos, etc.)

Intensité d'un champ magnétique. — La méthode qui va être indiquée peut aussi servir à l'étude du champ terrestre.

Nous supposerons qu'on l'applique à la mesure de l'intensité du champ dans un entrefer de machine, c'est-à-dire dans un espace très resserré : on forme pour cela une petite bobine plate de la manière suivante : sur les deux faces d'un disque de carton, sont collées deux lames plus larges de façon à constituer une sorte de poulie à gorge. Un fil de cuivre fin est enroulé dans la partie creuse et l'on a ainsi une bobine très plate qui peut facilement épouser la forme des divers entrefers. Ses extrémités sont reliées aux bornes d'un galvanomètre balistique.

Maintenons, par une poignée convenable, cette petite bobine dans la portion étudiée du champ magnétique; soit $\mathcal{H}$ l'intensité de ce champ. Si nous appelons S la section moyenne des spires (au nombre de n) nous recevons actuellement un flux

$$\mathcal{H}s$$

Brusquement, retirons le cadre du champ, nous produisons par induction une quantité d'électricité

$$\frac{n\mathcal{H}s}{R}$$

R étant la résistance totale du circuit. Le galvanomètre reçoit une impulsion α. On a donc

$$(1) \qquad \frac{n\mathcal{H}s}{R} = K\alpha$$

Si la constante K était connue, on calculerait aisément l'intensité $\mathcal{H}$ du champ. Mais il est préférable d'éliminer K en induisant dans le circuit un courant par l'action d'un solénoïde voisin. On passe, s'il est possible, un solénoïde très long à l'intérieur de la petite bobine toujours reliée au galvanomètre et on envoie, dans cette bobine, un courant d'intensité I mesurée à l'ampèremètre. Soient :

N le nombre de spires
L la longueur en centimètres
S la section.

On a un flux

$$\mathcal{N} = 1{,}25 \frac{\mathrm{N\,I}}{\mathrm{L}} . \mathrm{S}$$

d'où une quantité d'électricité induite au moment de la rupture

$$\frac{1{,}25 \frac{\mathrm{N\,I}}{\mathrm{L}} . \mathrm{S} \times n}{\mathrm{R}}$$

Il en résulte une impulsion α' telle que

$$(2) \qquad \frac{1{,}25 \frac{\mathrm{N\,I}}{\mathrm{L}} \mathrm{S} \times n}{\mathrm{R}} = \mathrm{K}\alpha'$$

Comparant (1) et (2), nous avons

$$\frac{\mathcal{H}s}{1{,}25 \frac{\mathrm{N\,I}}{\mathrm{L}} \mathrm{S}} = \frac{\alpha}{\alpha'}$$

d'où

$$\mathcal{H} = 1{,}25 . \frac{\alpha}{\alpha'} . \frac{\mathrm{S}}{s} . \frac{\mathrm{NI}}{\mathrm{L}}$$

Mesure de la perméabilité. — On opère, en général, en prenant le métal sous forme de barres ou de paquets de lames. Parmi les méthodes employées, nous citerons celles basées sur l'induction mutuelle d'une bobine, ayant pour noyau l'éprouvette, sur une autre bobine, et le procédé reposant sur la mesure de la force portante d'un électro formé autour de la barre d'épreuve.

Perméamètres d'induction. — Le métal est mis sous forme de deux éprouvettes

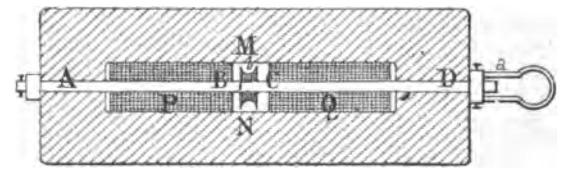


Fig. 322.

AB et CD (méthode Hopkinson) ; ces pièces sont passées dans les ouvertures pratiquées dans un cadre très épais en fer forgé (fig. 322) ; elles sont en contact en BC et peuvent

être écartées l'une de l'autre au moyen d'une poignée *a*. Autour des deux tronçons sont enroulées deux bobines magnétisantes P et Q dans lesquelles on envoie un courant mesuré à l'ampèremètre. On voit quelle est la disposition du champ magnétique : le circuit est bifurqué aux points A et D entre les branches M et N.

A la réunion des deux barres est une bobine plate *b* reliée à un galvanomètre balistique ; elle est sollicitée par un ressort qui tend à l'entraîner latéralement hors du champ magnétique. Ce mouvement se produit quand on tire la poignée *a*, et alors l'induction provoque dans la bobine *b* une quantité d'électricité égale à la variation de flux divisée par la résistance du courant électrique (galvanomètre compris).

Soit $\mathfrak{N}$ cette variation ; nous pouvons écrire, en négligeant la résistance magnétique de la partie AMDN, dont la section est considérable

$$\mathfrak{N} = \frac{1,25\,\mathrm{N\,I}}{\frac{\mathrm{L}}{\mu s}}$$

N représentant le nombre des spires de P et de Q réunies ;
I l'intensité du courant dans ces bobines ;
L et S la longueur et la section de l'éprouvette ;
μ le coefficient de perméabilité.

La quantité d'électricité induite est, s'il y a *n* tours dans la petite bobine

$$\frac{\mathfrak{N} n}{\mathrm{R}}$$

Elle donne à l'aiguille mobile une élongation α telle que

$$\frac{\mathfrak{N} n}{\mathrm{R}} = \mathrm{K}\alpha$$

d'où

$$\mathfrak{N} = \frac{\mathrm{K.R}}{n} \times \alpha$$

Si le galvanomètre est gradué, on peut calculer le flux $\mathfrak{N}$ qui traverse le métal et en déduire, par conséquent, l'induction $\mathfrak{B}$ ou le coefficient de perméabilité μ. On peut même déterminer $\mathfrak{N}$ pour un grand nombre de valeurs de la force magnétisante et, par suite, tracer la courbe du magnétisme.

Cette constrution conduit, comme on le sait, à la fixation de la perte par hystérésis.

Perméamètre à arrachement. — Cette méthode est plus rapide que la précédente. On sait que la force portante d'un électro s'exprime par la relation

$$\mathrm{P} = \frac{\mathfrak{B}^2\,\mathrm{S}}{8\pi g}\ \text{grammes.} \qquad (1)$$

$\mathfrak{B}$ étant l'induction et S la section de contact du noyau et de l'armature.

On peut procéder de différentes manières : prendre par exemple une éprouvette du métal passée dans la bobine magnétique B (méthode Sylvanus Thompson) et mettre l'extrémité inférieure C en contact avec le cadre de fer ADCE. Au moyen d'un dynamomètre, on exerce une traction sur la partie supérieure du fer: on note la valeur de cet effort P, insuffisant pour l'arrachement, et on *diminue* ensuite progressivement l'excitation de l'électro. A un moment donné, la tige se sépare du cadre; on note alors l'intensité I sur l'ampèremètre et on peut calculer la force magnétisante $\mathcal{H}$ qui lui correspond

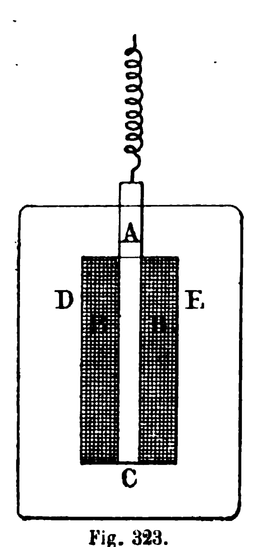


Fig. 323.

$$\mathcal{H} = 1{,}25 \frac{NI}{l} \qquad (2)$$

D'autre part on tire de (1) la valeur de $\mathcal{B}$ à ce même instant

$$\mathcal{B} = \sqrt{\frac{8\pi Pg}{S}}$$

Le coefficient de perméabilité μ est le quotient de $\mathcal{B}$ par $\mathcal{H}$.

Autres perméamètres. — Divers autres types d'instruments ont été imaginés. Il est évident que, dans les modèles précédents, les contacts de l'éprouvette avec les pièces magnétiques de l'appareil jouent un rôle important : un défaut d'ajustage peut entraîner une variation notable dans les résultats. Pour réduire à son minimum cette cause d'erreur, M. Helmer a construit un perméamètre de grande dimension, canon de 80 millimètres fermé à la bouche par un bouchon-guide et à la culasse par un cône magnétique contre lequel appuie l'éprouvette de *grande section*. Cette barre passe d'autre part dans le bouchon-guide et l'on peut, au moyen de solénoïdes convenables, employer les deux procédés induction et arrachement.

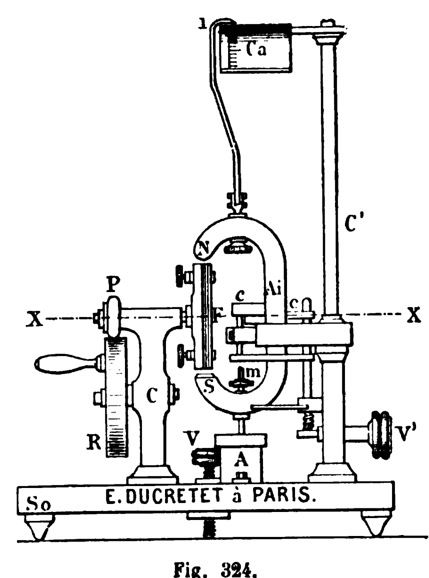


Fig. 324.

Un autre genre de perméamètre est basé sur la variation que subit la résistance électrique d'une spirale de bismuth placée dans le champ magnétique. Cette variation se détermine au moyen d'un pont et l'on obtient aisément, si l'appareil est étalonné, la valeur du flux d'induction.

Hystérésimètre d'Ewing. — On pourrait, à la rigueur, déterminer la perte par hystérésis au moyen d'un perméamètre, en construisant la courbe du magnétisme (page 187). L'aire comprise entre les deux

branches mesure en joules la perte par cycle et par centimètre cube de matière si on a soin de prendre pour abscisses les ampère-tours par centimètre, et pour ordonnées les indications divisées par le nombre 10^8.

L'appareil d'Ewing (fig. 324) est destiné à donner *immédiatement* le renseignement cherché : il consiste en un aimant permanent A*i* en forme de C pouvant basculer sur deux couteaux C. Autour du même axe X peut tourner, d'une façon indépendante, un paquet de lames de fer F serrées dans une petite presse et complétant en quelque sorte le circuit magnétique de l'aimant. Si ce métal ne présentait aucun retard dans l'aimantation et dans la désaimantation, sa rotation n'exercerait pas d'influence sur l'aimant voisin.

Mais si, au contraire, le métal possède de l'hystérésis, l'aimant est entraîné jusqu'à une certaine distance marquée par un index E sur un cadran *Ca*.

L'appareil présente quelque analogie avec le frein de Prony. La perte par hystérésis est d'autant plus grande que l'entraînement est plus considérable. Cet angle, d'ailleurs, ne varie pas avec la vitesse communiquée à la partie mobile.

On a comparé les déviations aux résultats donnés par la méthode précise et l'on a vérifié que *l'écart est proportionnel à la perte par cycle*.

Il suffit donc de posséder, avec l'*hystérésimètre*, deux échantillons-types dont la perte soit connue, pour pouvoir tarer l'instrument. Alors les mesures sont très rapides. A la rigueur, une seule détermination suffit pour un échantillon donné, car les pertes, pour les diverses inductions $\mathfrak{B}$, sont données par une formule de Steinmetz

$$W = \eta \, \mathfrak{B}^{1.6}$$

Si donc nous connaissons W et $\mathfrak{B}$, il nous est facile de calculer η, et par conséquent la valeur W pour une autre induction.

Hystérésimètre Blondel-Carpentier. — Dans ce second instrument, l'échantillon magnétique est placé dans un champ tournant et il est libre lui-même de suivre le mouvement communiqué au champ. Si le fer est parfaitement doux, il n'oppose aucune résistance au déplacement des lignes de force et il reste immobile dans ce champ tournant.

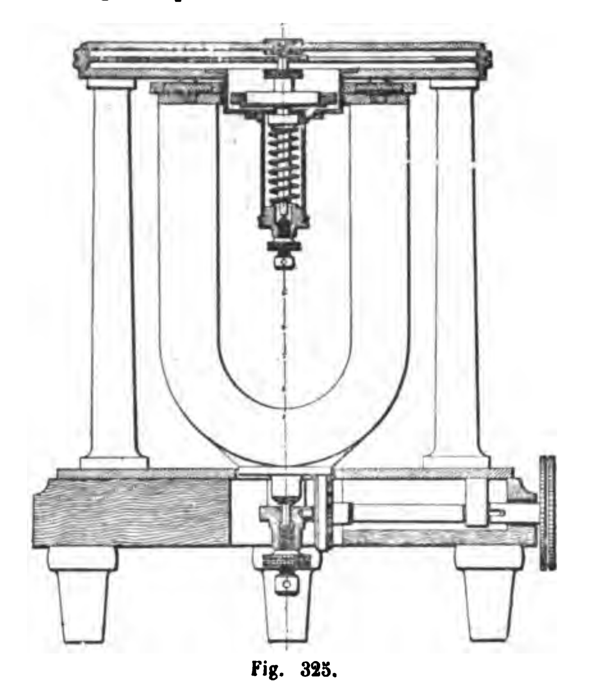
Au contraire, l'hystérésis provoque l'entraînement du fer dans le sens du mouvement des lignes de force et cette force de déplacement permet d'évaluer la perte due à l'hystérésis.

Le champ magnétique est constitué par un aimant en fer à cheval dont les branches sont verticales, et qui est mis en mouvement par une petite manivelle figurée à droite. L'intensité du champ égale 10.000.

L'échantillon est formé d'anneaux de tôle de diamètres extérieur et intérieur égaux respectivement à 55 et 38 millimètres. Ces rondelles sont superposées sur un support spécial de manière à former une épaisseur totale de 4 millimètres. Un index permet



de fixer la position des lames dans le champ ; il se meut sur un cercle divisé solidaire de la glace qui recouvre l'instrument.


Fig. 325.

Pour faire une détermination au moyen de cet instrument, on découpe dans les tôles étudiées des anneaux du calibre indiqué et l'on forme la petite pile de 4 millimètres d'épaisseur; le mouvement est alors donné à l'aimant permanent et on note l'entraînement du métal examiné, soit θ; on sait que la perte d'énergie W par centimètre cube et par cycle est proportionnelle à θ :

$$W = K\theta$$

On a, d'autre part, étudié une fois pour toutes, par la méthode du perméamètre, la constante η de Steinmetz pour un fer-type. De cette constante on tire aisément la perte W' correspondant à un centimètre cube de ce type et à un cycle, pour l'induction $\mathfrak{B}$ de l'appareil

$$W' = \eta \, \mathfrak{B}^{1,6}$$

Cet échantillon reçoit un entraînement θ' et l'on écrit

$$W' = K\theta'$$

d'où l'on tire :

$$\frac{W}{W'} = \frac{\theta}{\theta'}$$

et

$$W = W' \times \frac{\theta}{\theta'} = \frac{W'}{\theta'} \times \theta$$

$\frac{W'}{\theta'}$ est une constante que nous avons appelée K et qui est ainsi déterminée une fois pour toutes. On a donc finalement

$$W = K\theta.$$

SEPTIÈME PARTIE

PRODUCTION INDUSTRIELLE A COURANT CONTINU

CHAPITRE PREMIER

PRÉLIMINAIRES SUR LES MACHINES GÉNÉRATRICES EN GÉNÉRAL

Principe des machines. — Nous savons qu'un conducteur déplacé dans un champ magnétique est le siège d'un courant induit. Pour produire ce déplacement, on dépense une certaine somme de travail qui se transforme en énergie électrique : tel est le principe des machines génératrices de l'électricité.

Le plus généralement le conducteur en mouvement est un circuit fermé. Si on l'entraîne dans un champ, il doit nécessairement, après quelque temps, reprendre sa position initiale pour recommencer à s'en écarter et ainsi de suite. Le courant varie donc périodiquement ; il est alternatif comme nous l'avons déjà montré dans le cas de la rotation d'un disque autour d'un de ses diamètres (voir page 215). C'est là la forme naturelle, en quelque sorte, du courant électrique.

Dans certains cas, cette forme se prête bien aux usages que l'on veut faire de l'électricité. Alors, il suffit de relier les extrémités a et b du fil induit (fig. 326) à deux bagues métalliques A et B isolées l'une de l'autre et de l'arbre DD par un manchon CC.

Sur ces bagues appuient deux *frotteurs* ou *balais* α et β entre lesquels on recueille le courant.

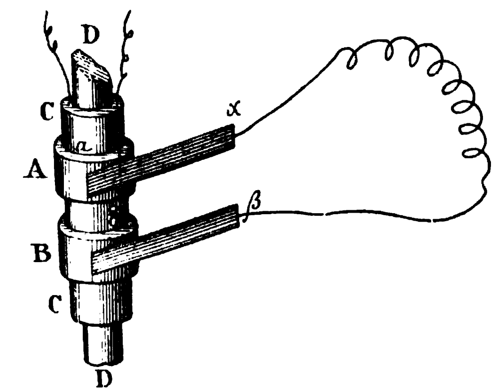


Fig. 326

Mais il peut être utile d'avoir un flux toujours de même sens comme celui des piles, par exemple. Alors il faut user d'un artifice, remplacer les deux bagues A et B par deux demi-coquilles A et B (fig. 327), présentant entre elles des interruptions. Les balais pressent encore ces pièces métalliques et ils doivent toucher les parties isolantes juste au moment où le courant engendré se renverse dans le circuit mobile ; il en résulte que l'un des frotteurs sert *toujours*

au départ de l'électricité, l'autre est employé au retour ; le courant extérieur a donc un sens invariable : il est dit *redressé*.

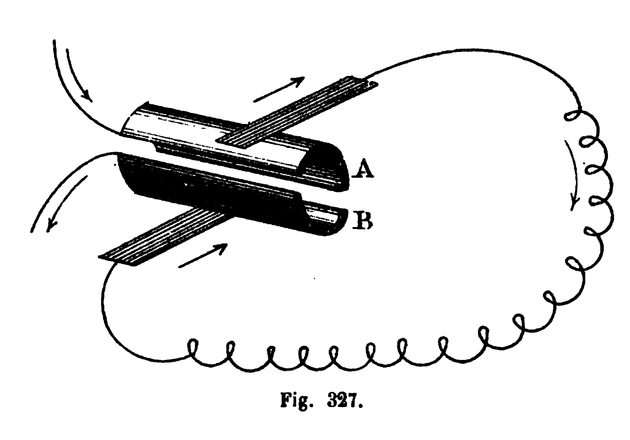


Fig. 327.

Classification des machines. — Ce qui vient d'être exposé permet de classer les machines en plusieurs catégories :

1° *Machines à courant redressé* ou à *courant continu*. — On les désigne ordinairement par les simples noms de *dynamos* ou de *magnétos* ;

2° *Machines à courants alternatifs* encore appelées *alternateurs* ;

3° Parmi ces dernières, on classe des machines produisant des combinaisons particulières de courants alternatifs, sous le nom de *courants polyphasés*. Ces machines sont des *alternateurs polyphasés*.

Magnétos et dynamos. — Les machines employées à la production de l'électricité exigent un champ magnétique. Ce champ peut être engendré soit par des aimants, soit par des courants. Dans le premier cas, la machine est dite *magnéto-électrique* ou simplement *magnéto*.

On réserve le nom de *dynamos* aux appareils qui doivent leur champ à des courants. De ces deux classes d'instruments, la première, qui comprend les magnétos, n'a qu'une importance secondaire. On fait à peu près exclusivement usage aujourd'hui de *dynamos*.

CHAPITRE II

ÉTUDE SOMMAIRE D'UNE MACHINE A COURANT CONTINU

Magnéto Gramme. — La première machine, construite suivant les principes actuels, et qui mérite d'être rappelée, est la *magnéto Gramme*. La figure 328 la représente ; elle comprend :

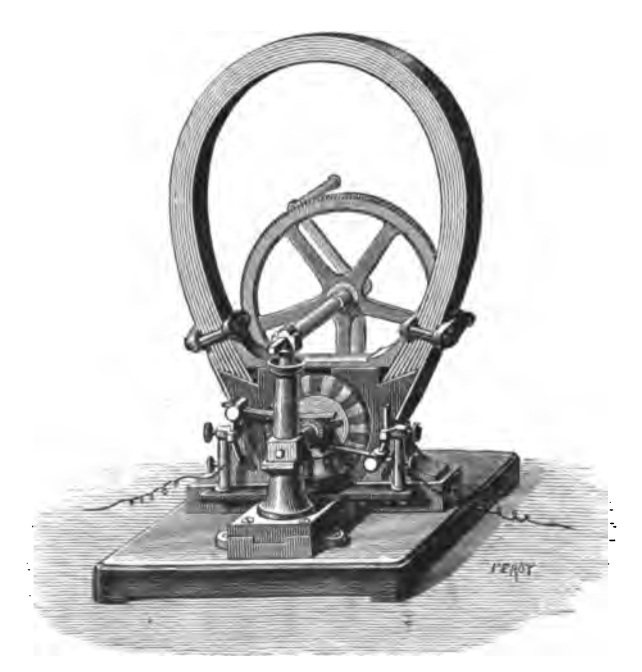


Fig. 328.

1° Un aimant en fer à cheval feuilleté et muni de pièces polaires présentant entre elles un espace cylindrique pour la rotation de l'anneau ;

2° Une bobine, enroulée sur un tore de fer, à laquelle on communique un mouvement de rotation rapide ;

3° Un collecteur, entraîné par l'arbre, destiné à la prise du courant. Sur cette pièce appuient deux balais conducteurs entre lesquels l'électricité est recueillie.

Pièces essentielles d'une machine. — Toute machine présente les diverses pièces que l'on vient d'énumérer, à savoir :

1° Un inducteur pour la production du champ ;

2° Un induit, siège du courant principal ;

3° Un collecteur avec ses balais.

Nous allons étudier sommairement ces trois pièces. Mais en plus de ces parties absolument essentielles au point de vue électrique, il existe d'autres organes non moins indispensables ; tels sont : l'arbre qui entraîne la partie mobile, inducteur ou induit suivant le cas, un bâti avec paliers et coussinets, pour supporter l'arbre, etc.

Inducteurs. — Nous supposerons toujours une dynamo. L'électro employé est souvent du type à *culasse*. Nous lui distinguerons plusieurs parties :

1° Les *noyaux* destinés à recevoir les bobines magnétisantes ;

2° La *culasse* qui réunit les noyaux ;

3° Les *pièces polaires* garnissant les extrémités opposées à la culasse. Elles sont alésées de manière à permettre la rotation de l'induit ;

4° Les *bobines inductrices*.

Entre les pièces polaires règne un entrefer cylindrique de largeur considérable dans lequel les lignes de force magnétique s'épanouissent ; il en résulte que la partie mobile ne coupe pas tout le flux qui traverse la culasse et les noyaux. Cet effet, d'ailleurs, est exactement le même quand l'inducteur est magnétique.

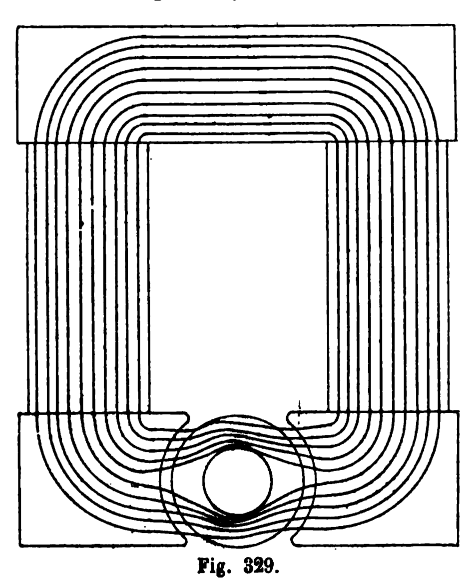


Fig. 329.

On a intérêt à éviter ces pertes de flux et on y arrive facilement en interposant, dans l'intervalle des pôles une pièce de fer doux, ou *armature*, présentant la forme d'un cylindre creux. Dans ces conditions, le fer, en vertu de sa grande perméabilité magnétique, concentre les lignes de force dans sa masse ; de sorte que le champ magnétique nous apparaît alors comme l'indique le tracé (fig. 329) : les lignes de force sont toutes fermées ; les unes passent par la moitié supérieure du tube de fer ; les autres par le bas.

On trouve deux avantages à opérer ainsi :

1° La déperdition des lignes de force et leur passage en dehors de l'induit sont évités ;

2° La diminution très grande subie par l'entrefer réduit la résistance magnétique du circuit, et par suite augmente le flux de force engendré. On laisse entre l'*armature* de

fer et les pièces polaires un entrefer suffisant pour le bobinage des fils induits et pour le jeu de la partie mobile.

Induit. — Il est constitué par des fils de cuivre enroulés sur l'*armature* ou *âme* dont il vient d'être parlé. L'ensemble forme une bobine sans commencement ni fin dont les spires suivent les génératrices des deux cylindres limitant le tube. On a ce qu'on appelle un *anneau Gramme*.

Production du courant dans une spire. — Soient N et S les pièces polaires. Prenons entre elles l'armature de fer et supposons une spire *a* se déplaçant dans le sens de la flèche, avec une certaine vitesse angulaire. Suivant sa position, cette boucle livre passage à une quantité variable de flux : en 1 (fig. 330) le flux est nul comme on peut s'en convaincre par l'observation de la figure 329 qui représente les lignes de force. Puis de 1 à 2 ce flux augmente pour atteindre, dans cette dernière position, sa valeur maxima. Le déplacement se poursuivant, on assiste, de 2 à 3, à une diminution jusqu'à zéro, et dans la partie inférieure du parcours, les mêmes variations se produisent.

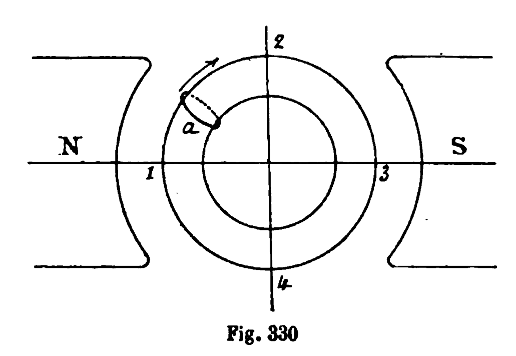


Fig. 330

Ainsi en résumé pour le sens de déplacement supposé, le flux croît de 1 à 2 et de 3 à 4 ; au contraire, il décroît de 2 à 3 et de 4 à 1. Pour nous rendre compte des courants d'induction engendrés dans cette spire en mouvement, nous appliquerons la loi de Maxwell :

1° De 1 à 2 le flux *croît* et il marche de 1 vers 2 ; nous devons donc faire mouvoir le tire-bouchon de 2 vers 1 (sens *inverse* des lignes de force). Le courant est alors représenté par la petite flèche parallèle à la spire (fig. 331) ;

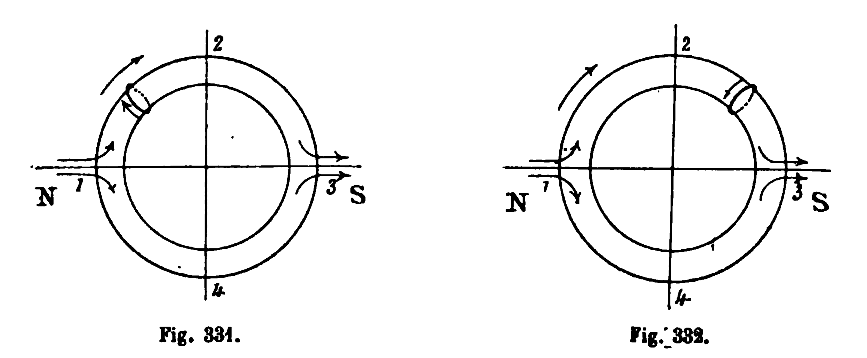


Fig. 331. Fig. 332.

2° De 2 à 3, le flux a même sens, mais il décroît ; le tire-bouchon doit avancer de 2 vers 3, ce qui indique un courant marqué par la flèche (fig. 332) ;

3° De 3 à 4, flux dirigé de 4 vers 3 et augmentant, on enfonce l'instrument de 3 à 4, d'où le courant induit (fig. 333) concordant avec celui du deuxième quart de tour ;

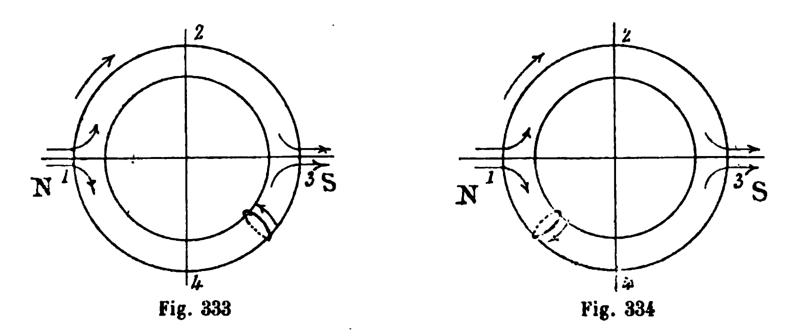


Fig. 333 Fig. 334

4° 4 à 1, flux décroissant, sens 1 à 4 ; c'est aussi celui du mouvement de la vis : le courant induit est dirigé comme celui du premier quadrant (fig. 334). Donc, en résumé: à droite de la ligne 2-4, axe de symétrie de la machine, le courant induit a un sens ; à gauche, il a le sens inverse.

La valeur numérique de la force électromotrice varie avec la position de la spire : d'après la loi générale de l'induction, c'est le quotient de la variation de flux par le temps employé. Supposons l'induit entraîné d'un mouvement uniforme vers la position 1, là où les lignes de force sont serrées; le flux varie rapidement à partir de zéro ; la force électromotrice acquiert sa valeur maxima. Au contraire, vers la ligne axiale, au moment où le flux passe par son maximum, en 2, la variation est lente et la f. é. m. nulle. Cette ligne 2-4 est dite *ligne neutre*.

Pour deux positions de la boucle symétriques par rapport à l'axe de rotation, la valeur numérique de e est la même.

Si nous suivons une spire a dans une révolution complète, nous la voyons traversée par un courant qui de 2 à 3 augmente pour diminuer ensuite de 3 à 4; à ce moment, le passage de l'électricité est nul ; mais il recommence dans un sens opposé, de la position 4 à la position 2, en passant par un maximum en 1.

Nous avons donc là un *courant alternatif* dont la période coïncide ici avec la durée d'une révolution complète.

Remarque. — Nous avons supposé la spire *glissant* le long de l'anneau, cette armature elle-même étant immobile ainsi que les inducteurs. Mais, à cause de l'instantanéité des aimantations et des désaimantations du fer doux, on peut donner à la boucle l'armature comme support ; cette pièce rigide reçoit alors le mouvement par l'arbre et entraîne avec elle le conducteur qui lui adhère. Les phénomènes doivent alors être les mêmes que si le fil seul était déplacé.

Mais il y a cependant certaines perturbations qui résultent de cette disposition :

1° Les aimantations et les désaimantations de l'armature qui doit présenter en regard des pièces polaires deux pôles contraires à ceux de l'inducteur, éprouvent un certain retard (phénomène d'hystérésis) ;

2° L'armature est un corps conducteur de l'électricité ; déplacée dans un champ magnétique, elle devient le siège de courants de Foucault. Nous avons vu d'ailleurs comment on peut atténuer ce dernier effet (voir page 229).

Courant total de l'induit. — Nous avons supposé une seule boucle. Or il y en a un grand nombre et nous en trouvons dans toutes les positions. Considérons, à un moment donné, deux boucles diamétralement opposées. En raison même de cette disposition, les f. é. m. développées dans les deux sont égales en valeur absolue, mais elles ont des sens opposés et par suite se détruisent mutuellement. Toutes les spires peuvent ainsi être accouplées et l'ensemble ne produit alors aucun courant résultant dans la bobine induite.

Le collecteur, que nous allons examiner, a pour rôle de tirer tout le parti possible de ces courants qui s'annulent sans lui.

Collecteur. — A un moment donné, toutes les forces électromotrices développées dans la partie droite de l'induit ont un sens; celles qui se produisent dans la seconde moitié sont de sens opposé et si l'on fait la somme de ces deux séries de forces électromotrices, on obtient des totaux égaux. Les deux courants provenant des deux différences de potentiel se détruisent comme nous l'avons dit. Nous nous trouvons donc en présence de deux sources d'électricité égales A et B mises en opposition (fig. 335), c'est-à-dire réunies par leurs pôles de même nom : il n'en résulte aucun effet, mais si nous disposons entre les fils une dérivation CD, nous permettons aux deux courants précédemment détruits de s'ajouter de C à D pour se séparer en D et rejoindre leurs sources respectives.

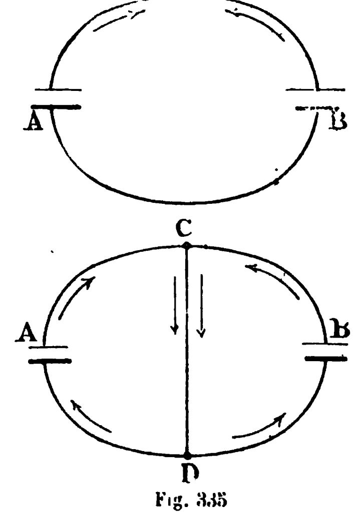


Fig. 335

Nous devons donc, dans le cas d'une dynamo, réunir par un fil, les deux points de la bobine qui sont, à un même instant, suivant la ligne neutre, entre les deux forces électromotrices contraires. Si le fil induit était nu, il suffirait de faire appuyer sur le pourtour de l'anneau, deux frotteurs touchant les génératrices placées dans la région neutre. Cela se fait quelquefois

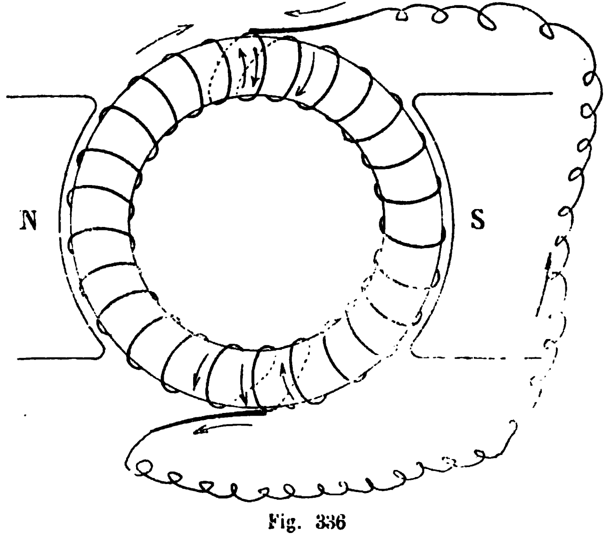


Fig. 336

(fig. 336) et on a soin alors de séparer les conducteurs *nus* par un isolant convenable, mais le plus ordinairement le fil est isolé avant son enroulement et il faut employer alors un *collecteur*. Pour expliquer le jeu de cette pièce, considérons huit spires sur l'anneau (fig. 337); deux spires consécutives sont reliées par les points a et chacune de ces connexions est rattachée à une tige ab coudée à angle droit en b et formant alors une lame disposée le long de l'arbre de rotation, mais soigneusement isolée de cette pièce et des lames voisines. L'ensemble de ces huit lames constitue avec les isolants, un cylindre complet sur lequel appuient deux *balais* BB' dont les points de contact sont suivant la ligne neutre. Les flèches, marquées sur la figure, montrent que les deux courants se réunissent en la touche 5 pour sortir par le balai B' et rentrer par B et la lame 1. A cet instant, les six autres touches sont inactives, mais bientôt, par suite du mouvement, les pièces 8 et 4 prendront la place de 1 et de 5 et le rôle actif appartiendra alors à cette nouvelle paire de touches. Ainsi toutes successivement viennent se mettre sous les balais. Telle est la disposition schématique du collecteur Gramme.

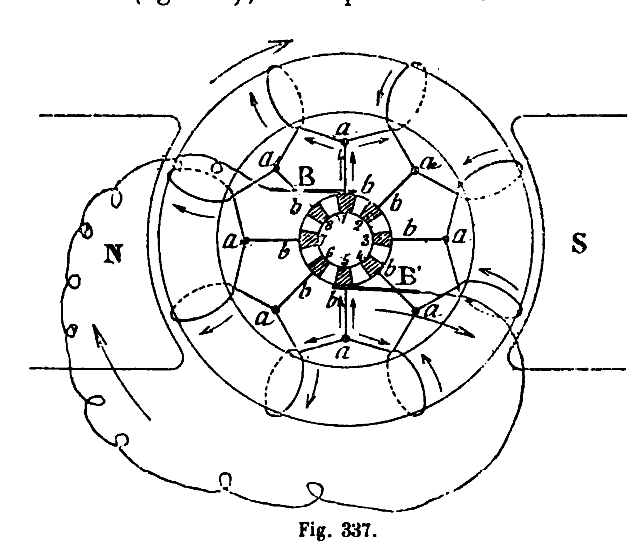


Fig. 337.

Nous pouvons maintenant rechercher la valeur de la force électromotrice à chaque instant; cette différence de potentiel est due aux quatre spires situées d'un même côté de la ligne neutre. Or, dans chacune, la durée de l'alternance (voir page 217) est le temps nécessaire à une demi-révolution, et les différents courants présentent les uns sur les autres un retard de phase d'un huitième de période.

Il en résulte que les forces électromotrices engendrées sont représentées par les courbes telles que oAB (fig. 338). La f. é. m. totale est à chaque instant la somme de celles indiquées par les courbes; on voit que les fluctuations sont peu importantes. Elles le seraient encore beaucoup moins si le nombre des spires était plus considérable. Remarquons d'ailleurs que la self-induction de l'induit empêche les variations brusques des courants partiels et atténue encore par conséquent les modifications du courant résultant.

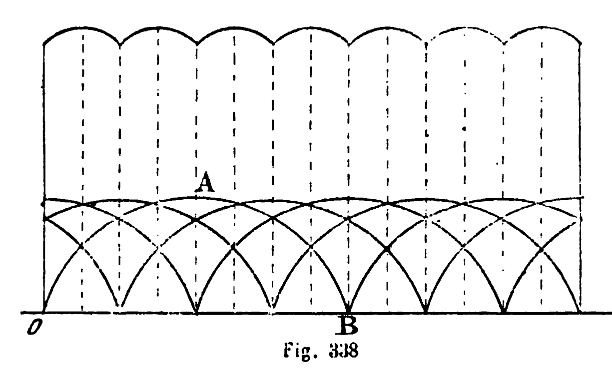
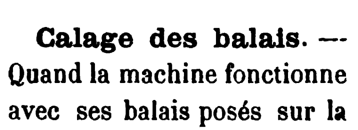


Fig. 338

Pratiquement, toutes les spires voisines sont à peu près dans la même situation vis-à-vis des inducteurs. Ce qu'on a dit d'une spire s'applique alors à chaque paquet, de sorte que l'on peut former sur l'armature une série de bobines comme l'indique le schéma (fig. 339). Chacune communique avec la suivante et cette *entre-section* est reliée à une lame du collecteur. Ajoutons qu'il y a, dans ce cas, intérêt à augmenter le nombre de sections. La raison est la même que dans le cas de spires séparées : on assure au courant résultant une plus grande constance.



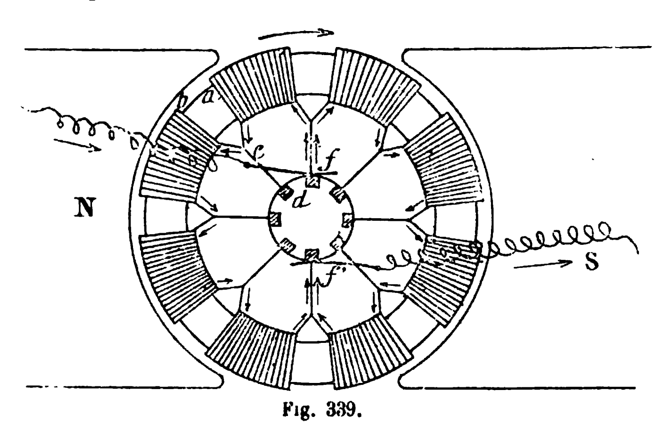


Fig. 339.

Calage des balais. — Quand la machine fonctionne avec ses balais posés sur la ligne neutre, on est frappé d'un fait : des étincelles jaillissent entre les frotteurs et les lames du collecteur. Il en résulte, entre autres inconvénients, une usure rapide des touches, ce qu'on évite d'ailleurs en déplaçant l'ensemble des balais dans le sens du mouvement.

Cette opération s'appelle le *calage des balais*, et l'angle de déplacement porte le nom d'*angle de calage*.

Nous aurons plus tard à étudier en détail ce phénomène dont les conséquences sont d'une grande importance.

Caractéristique externe d'une dynamo. — Une même dynamo peut produire, suivant les circonstances, une *quantité variable* d'électricité à une *tension* également *variable* ; mais si la vitesse de rotation est bien réglée, le débit dépend essentiellement de la résistance du circuit formé entre les deux balais, en dehors de la machine, et la valeur de la différence de potentiel constatée entre les bornes en découle.

Il y a donc une relation entre le débit i et la tension e pour la vitesse donnée :

$$e = f(i)$$

et la connaissance de cette relation est d'une grande utilité, comme nous le verrons dans un instant.

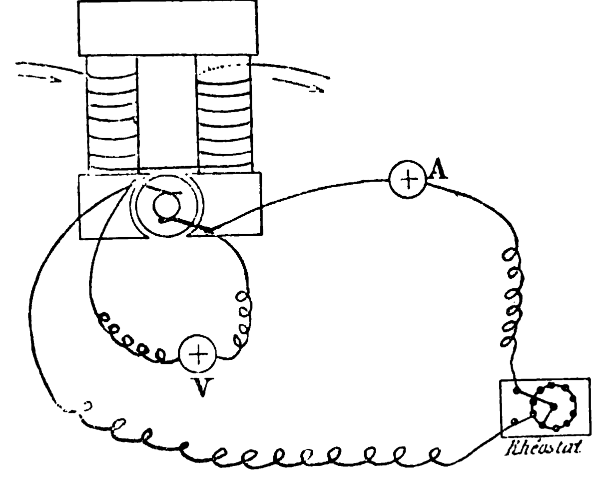


Fig. 340.

La fonction $e = f(i)$ se représente par une courbe : en abscisses on porte les intensités, en ordonnées les forces électromotrices correspondantes. Cette courbe s'appelle la *caractéristique externe* de la dynamo, pour la vitesse indiquée. La construction se fait par points ; il faut pour cela (fig. 340) :

1° Un rhéostat à résistances très variables pouvant tenir lieu du circuit extérieur ;

2° Un ampèremètre que l'on dispose en A sur ce circuit. Il mesure l'intensité i;

3° Un voltmètre V, placé en dérivation, indique sous quelle tension e l'électricité est recueillie.

On fait une première expérience à circuit ouvert en maintenant constante la vitesse et l'on détermine les deux valeurs de e et de i ; puis on ferme le circuit sur le rhéostat en ayant soin d'employer le maximum de résistance et l'on fait deux nouvelles mesures de e et de i. On continue de même en diminuant progressivement la résistance du circuit.

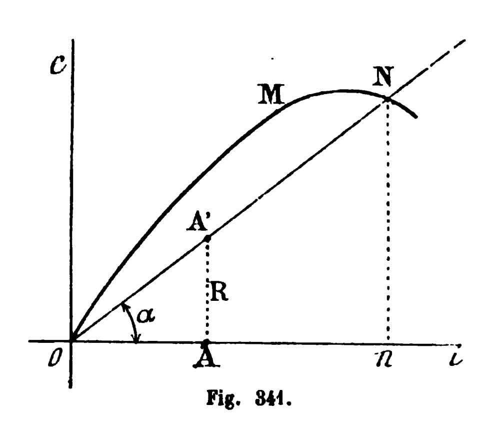


Fig. 341.

Chaque expérience donne un point ; en joignant tous les points, on obtient la caractéristique externe. On voit (fig. 341) une telle courbe. Cherchons de suite quelle utilité elle peut présenter :

1° Elle va nous indiquer le régime du fonctionnement de la dynamo qui débite son courant dans un fil de résistance connue R.

Entre l'intensité i, le voltage e et la résistance R règne, en effet, la relation d'Ohm

$$i = \frac{e}{R}$$

ou

$$R = \frac{e}{i}$$

Nous connaissons donc le rapport des deux inconnues i et e ; c'est une première relation ; la caractéristique va nous fournir la seconde, ce qui nous permettra de déterminer les deux quantités cherchées.

Soit le point N de la courbe ; il correspond à une intensité On et à une force électromotrice Nn. L'angle NOn soit α du vecteur ON avec l'axe horizontal a pour tangente trigonométrique :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\overline{Nn}}{\overline{On}} = \frac{e}{i} = R.$$

Cette propriété nous permet de trouver le point N si nous connaissons la tangente de α, c'est-à-dire la résistance R. Sur l'axe Oi nous portons $OA = 1$, puis, sur la perpendiculaire AA' menée en A, nous prenons une longueur $AA' = R$ et nous traçons la droite OA' qui coupe la courbe en N : N est le point cherché, car on a bien

$$\frac{e}{i} = R = \operatorname{tg} \alpha.$$

La longueur Nn donne le nombre de volts, On le débit en ampères ;

2° Supposons que la machine soit destinée à alimenter un circuit comprenant des sources de force électromotrice contraire à celle de cette dynamo. Nous pouvons encore, grâce à la caractéristique externe, déterminer le régime.

Soient : e' la force électromotrice contraire.

R la résistance du circuit.

Nous avons entre l'intensité i, la f. e. m. e, la résistance R, et la f. e. m. contraire e la relation suivante, d'après la loi d'Ohm

$$i = \frac{e - e'}{R}$$

ou

$$R = \frac{e - e'}{i}$$

C'est une première relation entre i et e ; la seconde est donnée encore par la caractéristique.

Pour trouver le point relatif au régime cherché, portons une longueur Oe' égale à e' sur l'axe Oe ; il s'agit, comme on le voit aisément en considérant les formules ci-dessus, de mener par ce point e' une droite de coefficient angulaire égal à R : par e' nous tracerons la parallèle $e'x$ à l'axe horizontal puis sur la ligne AA' déjà menée précédemment, nous porterons $aa' = R$ et nous joindrons e' et a' : la caractéristique, dans la figure 342, est coupée en deux points, dont un seul N peut en réalité être utilisé. Nous aurons donc :

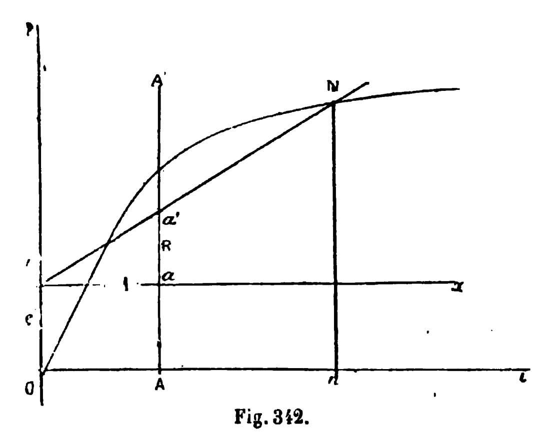


Fig. 342.

Intensité $i = On$
Voltage $e = Nn$

3° La caractéristique externe indique encore la puissance de la dynamo pour le régime adopté. En effet, ce travail disponible par seconde est :

$$P = ei \text{ watts}$$
$$= \frac{ei}{1.000} \text{ kilowatts.}$$

Or, une même puissance peut être obtenue pour différentes valeurs de e et de i. Pour avoir 1 kilowatt, il suffit que le produit $ei = 1.000$, etc. Toutes les valeurs de e et de i qui satisfont à cette équation sont les coordonnées d'une courbe

$$ei = \text{const.}$$

On reconnaît l'hyperbole équilatère rapportée à ses asymptotes. Nous pouvons construire toutes les courbes semblables pour les valeurs 1.000, 2.000, 3.000, etc. de la constante (fig. 343). Certaines d'entre elles coupent la caractéristique; soit un point C,

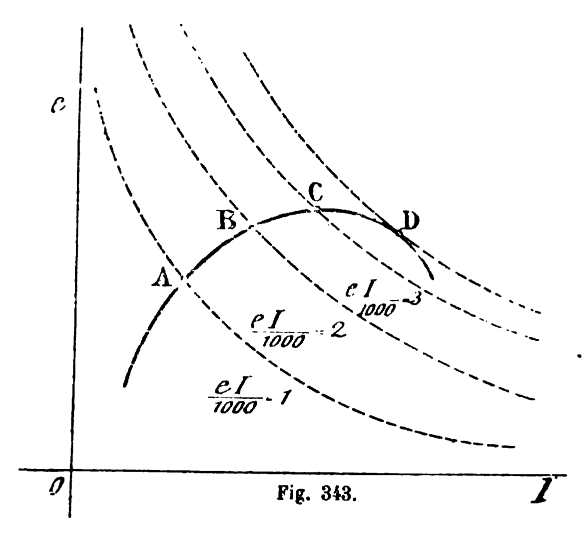


Fig. 343.

par exemple; ce point correspond à un régime de marche de la dynamo : celui pour lequel la puissance est de 3 kw. Ainsi les intersections A, B, C et D donnent les puissances 1, 2, 3, 4 kw.

De A à B la puissance est intermédiaire entre 1 et 2 kw et de même pour les autres intervalles.

Cette étude sommaire de la dynamo étant faite, nous allons maintenant revenir séparément à chacune des parties essentielles dans deux chapitres spéciaux ; nous nous occuperons d'abord des inducteurs, ensuite de l'induit avec son collecteur et ses balais.

CHAPITRE III

ÉTUDE DES INDUCTEURS

Les inducteurs ont pour rôle la création d'un champ magnétique dans la région traversée par l'induit.

Ce sont, d'une manière générale, des électro-aimants munis de pièces polaires embrassant chacune une portion de l'induit ; il s'agit d'indiquer d'abord le mode d'excitation de ces inducteurs.

Modes d'excitation des inducteurs. — Le premier mode qui s'est présenté consiste à faire passer dans les bobines le courant d'une source étrangère : piles, accumulateurs ou autre machine.

Supposons une machine à deux pôles ; le courant d'excitation passe successivement d'une bobine à l'autre puis revient au second pôle de la source.

La dynamo est dite alors à *excitation séparée* (fig. 344).

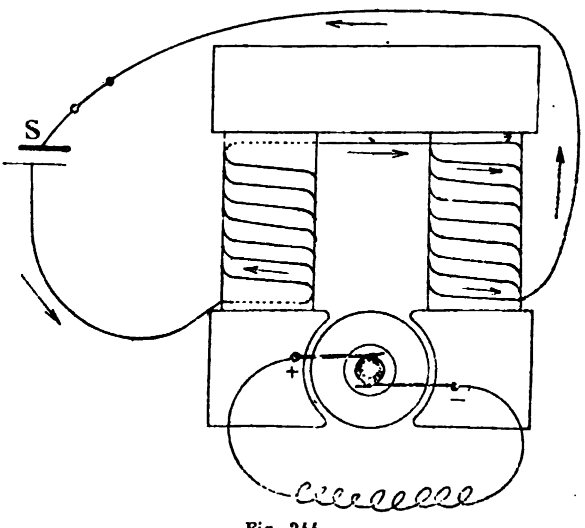


Fig. 344.

Mais le système nécessite une source étrangère ; la découverte de l'*auto-excitation* a supprimé cette complication. On a remarqué que les noyaux de l'électro, aimantés une première fois par un courant quelconque, conservent toujours un peu de magnétisme rémanent. Cette trace d'aimantation suffit à engendrer un champ magnétique dans la région de l'induit, d'où la production d'un courant d'induction pendant la rotation. Si on envoie, et dans un sens convenable, ce courant *très faible* (en entier ou partiellement) dans les bobines des électros, on renforce le champ et le débit de la dynamo augmente un peu ; les mêmes effets continuent progressivement ; la machine s'amorce et elle finit par atteindre son régime normal en assurant l'alimentation de ses inducteurs.

Cette *dynamo auto-excitatrice* se dispose de plusieurs façons :

1° On peut intercaler les bobines dans le courant obtenu en ayant soin de donner

au fil enroulé sur les noyaux une section suffisante et une longueur assez faible pour éviter l'absorption d'une trop forte somme d'énergie.

Les appareils récepteurs d'électricité et les inducteurs sont alors sur le même circuit; ils sont en tension ou en série. La dynamo est dite *excitée en série* (fig. 345);

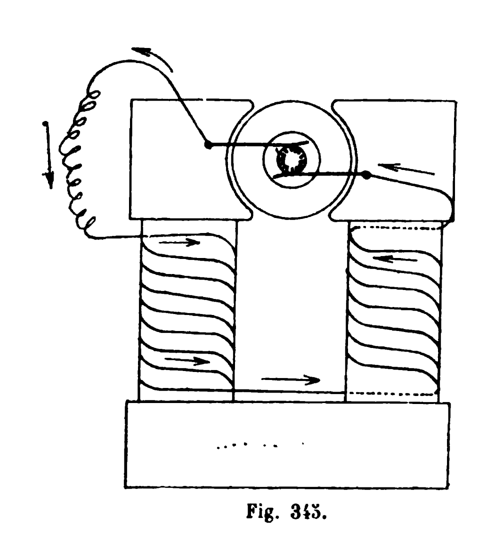


Fig. 345.

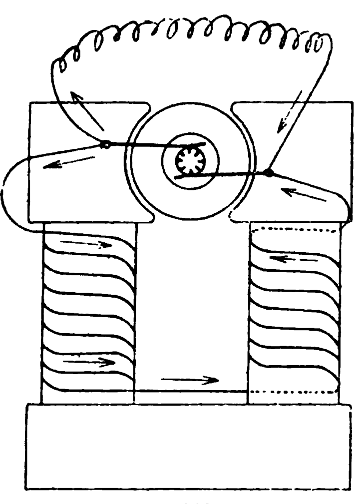


Fig. 346.

2° On dérive seulement une portion du courant principal et on l'envoie dans les bobines. D'après les lois des circuits dérivés, ce fil doit avoir une résistance assez grande si on ne veut pas que la majeure partie de l'électricité aille dans les électros : on le fait long et fin. Cette longueur permet d'ailleurs d'augmenter le nombre des spires et de compenser ainsi la faiblesse de l'intensité. On a alors une dynamo *excitée en dérivation* ou une *dynamo-shunt* (fig. 346) ;

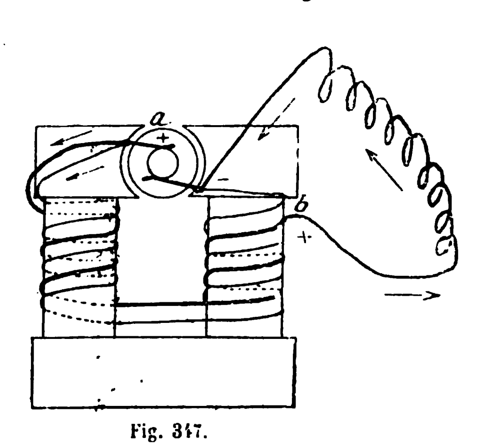


Fig. 347.

3° Enfin, si aucun des deux modes précédents ne donne pleine satisfaction, on a recours à un système mixte. Le procédé s'impose quand l'excitation série et l'excitation dérivation présentent des inconvénients opposés. On combine alors les deux enroulements : le courant principal passe en entier dans les bobines, au moyen du gros fil, comprenant peu de spires. On envoie aussi, suivant un fil fin, et dans le même sens, une dérivation prise entre les deux bornes. On a ainsi une *excitation composée* ou *compound* (fig. 347).

Détermination de l'excitation de la dynamo. — Nous avons étudié sommairement (voir page 179) un circuit magnétique formé de trois pièces traversées par des flux supposés différents. Dans une dynamo, nous pouvons admettre que le flux

a une même valeur dans l'armature et dans l'entrefer, soit $\mathfrak{N}$; mais dans les inducteurs (pièces polaires, noyaux et culasse) le flux a une valeur $\mathfrak{N}'$ supérieure à $\mathfrak{N}$ à cause des fuites magnétiques. Dès lors, si nous appelons :

$\mathfrak{R}$ la résistance de l'armature
$\mathfrak{R}_1$ — de l'entrefer
$\mathfrak{R}'$ — des pièces magnétiques des inducteurs,

nous pouvons écrire

(1) $$1,25\,\mathrm{NI} = \mathfrak{N}\mathfrak{R} + \mathfrak{N}\mathfrak{R}_1 + \mathfrak{N}'\mathfrak{R}'$$

Généralement, on fait usage du *coefficient* dit d'*Hopkinson* ou *de perte de flux*. Ecrivons :

$$\mathfrak{N}' = \nu\mathfrak{N}$$

$\nu > 1$ est ce coefficient. Dès lors nous écrirons (1) de la manière suivante :

(2) $$1,25\,\mathrm{NI} = \mathfrak{N}\mathfrak{R} + \mathfrak{N}\mathfrak{R}_1 + \nu\mathfrak{N}\mathfrak{R}'$$

Cette valeur $\mathfrak{N}$ du flux dans l'armature entraine pour l'induction des valeurs $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{B}_1$ et $\mathfrak{B}'$ dans les différentes parties du circuit magnétique, et si l'on appelle n, n_1 et n les nombres correspondants tirés du tableau (page 174), et l, l_1 et l' les longueurs respectives des portions, on a :

(3) $$\mathrm{NI} = nl + n_1 l_1 + n'l'$$

formule établie déjà et montrant que les ampères-tours nécessaires égalent la somme des ampères-tours relatifs aux différentes parties du circuit magnétique. Ces ampères-tours partiels, demandés par les diverses portions, peuvent être considérés comme des fonctions du flux *utile*, c'est-à-dire du flux $\mathfrak{N}$ qui traverse l'armature. Dès lors nous pouvons établir trois courbes ayant pour abscisses les valeurs du flux $\mathfrak{N}$ et pour ordonnées les valeurs de nl pour la première courbe, de $n_1 l_1$ pour la seconde et de $n'l'$ pour la troisième. Ces courbes sont représentées (fig. 348) et marquées respectivement : *armature, inducteurs, entrefer*.

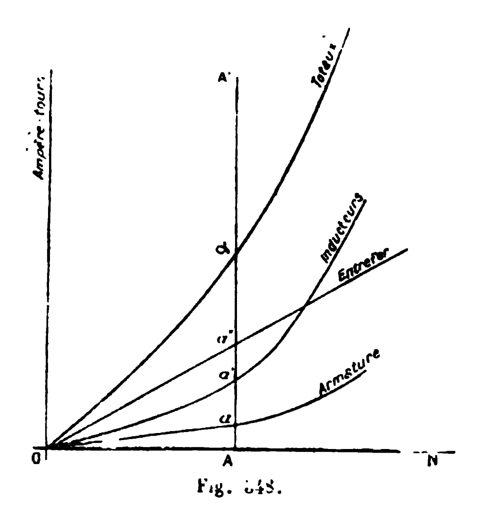


Fig. 348.

Soit OA un flux fixé pour l'armature; menons la droite verticale AA'; elle coupe les diverses courbes en des points a, a' et a'' et le segment Aa, en particulier, représente les ampères-tours relatifs à l'armature ; il en est de même pour les inducteurs et pour l'entrefer; de sorte, que les ampères-tours nécessaires au total, à l'établissement du flux $\mathfrak{N}$ dans l'armature seront égaux à la somme

$$\mathrm{A}a + \mathrm{A}a' + \mathrm{A}a''$$

Soit Aα ce total ; nous pouvons opérer de même pour toutes les autres valeurs du flux $\mathfrak{N}$, et le lieu des points tels que α nous donnera une courbe Aα ; c'est la *courbe du magnétisme* de la machine.

Nous allons reprendre maintenant avec quelques détails chacune des classes d'inducteurs que nous venons d'indiquer, c'est-à-dire :

1° L'excitation séparée ;
2° L'excitation en série ;
3° L'excitation en dérivation ;
4° L'excitation compound.

Nous ajouterons même à cette dernière catégorie un mode particulier :

5° L'excitation hypercompound.

1° Excitation séparée. — Le champ magnétique créé par les inducteurs est, dans ce cas, indépendant de la marche de la machine elle-même. La dynamo fonctionne alors à peu près comme une pile : à vitesse constante, sa force électromotrice ne varie pas, mais la différence de potentiel dont on peut disposer entre les pôles change, comme dans une pile, avec la résistance du circuit extérieur; pour un fil très résistant, cette différence de niveau est grande; elle prend au contraire une toute petite valeur quand on réunit par un court-circuit les pôles de la machine. Une deuxième cause, l'action magnétique de l'induit, se joint à la précédente pour diminuer la différence de potentiel relative à un débit donné. Cette diminution constitue la *réaction d'induit*.

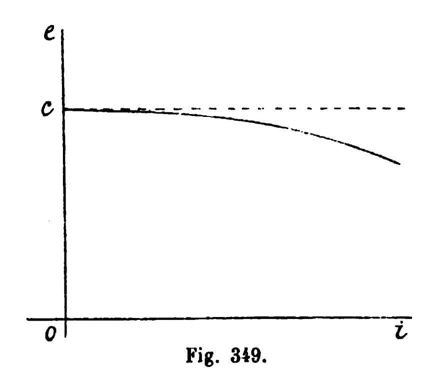


Fig. 349.

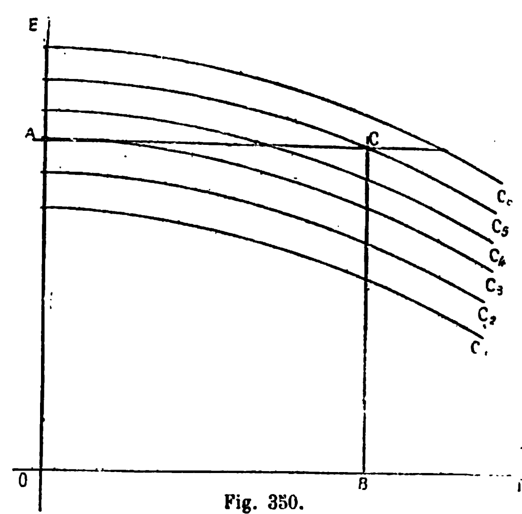


Fig. 350.

La figure 349 nous montre le tracé de la caractéristique externe correspondant à une excitation donnée ; on voit que la f. é. m. diminue quand nous demandons à la dynamo un plus fort débit.

Si nous modifions l'alimentation des inducteurs, nous obtenons un courant différent et il est intéressant de chercher comment varie ce courant. On peut, pour cela, tracer les caractéristiques correspondant aux diverses valeurs du courant d'excitation; nous obtenons alors une série de courbes (fig. 350) ayant toutes même allure que la précédente et qui sont, par ordre d'excitation croissante, c_1, c_2, c_3...

La considération de ces courbes nous montre comment l'excitation doit varier, pendant la marche de la dynamo, si nous voulons maintenir aux bornes une différence de potentiel donnée, soit OA, pour des intensités croissant de 0 à OB : pour $i = 0$, l'excitation sera celle qui correspond à la courbe c_3 ; pour $i = OB$, l'excitation répondra à c_8 et pour des débits intermédiaires, nous ferons varier le courant des inducteurs, d'une façon progressive, entre ces deux valeurs extrêmes.

Nous avons considéré des caractéristiques *externes* correspondant chacune à une valeur déterminée de l'excitation. On peut encore envisager ce qu'on appelle la *caractéristique à circuit ouvert* : pour cela portons en abscisses les intensités ou les ampères-tours *variables* des inducteurs et, en ordonnées, les forces électromotrices mesurées entre les bornes de la machine, supposées non reliées par un circuit, pour chaque valeur de l'excitation. Ces f. é. m. sont, comme nous l'établirons plus loin, proportionnelles aux valeurs correspondantes des flux produits dans l'anneau ; il en résulte que la caractéristique à circuit ouvert reproduit la courbe du magnétisme (fig. 348).

Si au lieu de laisser la machine sans conducteur interpolaire, nous disposons un circuit entre les deux bornes, nous obtenons une force électromotrice qui, à excitation égale, est inférieure à la différence de potentiel précédente et cela pour les deux raisons énoncées à la page 346. La réaction d'induit s'exprime en fonction du débit et nous pouvons construire une courbe pour la représenter : en abscisses, portons les débits I et en ordonnées les pertes de tension ε correspondantes ; nous avons ainsi le tracé (fig. 351). L'expérience a indiqué, et nous en verrons plus tard l'explication, que cette perte est, pour un débit déterminé, d'autant plus forte que l'excitation est moindre (cette différence, entre les effets correspondant à diverses valeurs de l'excitation, ne devient d'ailleurs sensible que pour un débit assez considérable : la première portion OA de la courbe est une ligne droite).

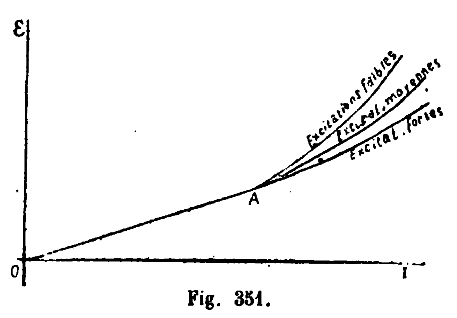


Fig. 351.

On remarque aisément que la connaissance de cette dernière courbe nous permet de tracer la caractéristique externe de la dynamo.

2° **Excitation en série**. — Le *même* courant traverse le circuit principal et les inducteurs ; c'est pourquoi on réduit la résistance des bobines en augmentant la section des fils et en diminuant leur longueur ; extérieurement on reconnaît donc ce mode d'excitation à la grosseur des conducteurs qui constituent les bobines. Les ampères-tours prennent alors leur valeur suffisante en raison du facteur I qui est considérable, tandis que N est relativement faible.

Caractéristique à circuit ouvert. — Supposons d'abord la machine excitée séparément avec un courant d'intensité I ; la différence de potentiel correspondant à chaque

valeur de I est donnée par la courbe OA (fig. 352). On remarquera que c'est la reproduction de la courbe du magnétisme.

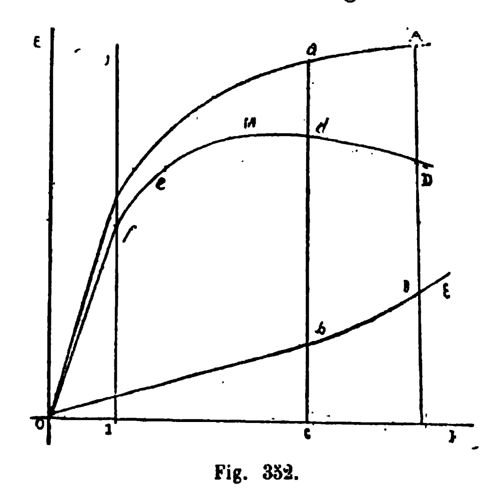


Fig. 352.

Nous pouvons, sur cette même figure, tracer la courbe de réaction d'induit, soit OB; elle nous donne, pour chaque valeur de I, quand la machine débite, la chute de tension due à cette réaction ; de sorte que la différence entre les ordonnées de ces deux courbes, pour une même abscisse, nous indique la valeur de e disponible entre les deux bornes de la dynamo.

Caractéristique externe. — Cette courbe est O D (fig. 352), lieu des points d tels que

$$Cd = Ca - Cb$$

elle comprend à partir de l'origine, une portion à peu près rectiligne Oe continuée par une courbe eMD qui possède un point d'ordonnée maxima. De cette forme de la caractéristique nous tirerons quelques conséquences :

1° En circuit ouvert c'est-à-dire quand les pôles de la machine ne sont pas réunis par un conducteur, la dynamo-série ne fonctionne pas. En effet un circuit ouvert est un conducteur de résistance infinie et, pour trouver le point de la courbe qui correspond à une telle résistance, nous devons porter sur la droite 11 (à la distance unité de l'origine) une longueur infiniment grande et joindre son extrémité au point O. La rencontre de la caractéristique et de cette droite donne le point cherché. Or, cette droite n'est autre chose que OE (puisque la résistance est infinie) ; elle ne coupe pas la courbe et cela indique que la dynamo ne doit pas fonctionner.

2° Diminuons la résistance du circuit extérieur ; la marche reste impossible tant que la résistance est supérieure à $1f$. Pour $R = 1f$ la machine peut s'amorcer mais son courant est irrégulier et il suffit de la moindre fluctuation pour arrêter le fonctionnement. Cette résistance $R = 1f$ s'appelle *résistance critique* de la dynamo.

3° Supposons que l'on continue à faire décroître la résistance du circuit : nous voyons augmenter le débit en même temps que la force électromotrice et cela jusqu'au point M. Quand on utilise la machine entre les limites O et M, on peut énoncer la loi : *Le voltage croît avec le débit.*

Dans la région M de la courbe, le *voltage est à peu près indépendant du débit.*

Enfin, si nous atteignons la région MD, partie plongeante de la caractéristique (et c'est souvent cette portion que l'on utilise), le *voltage décroît quand le débit augmente.*

Ces différentes particularités se vérifient aisément par l'expérience. En particulier, nous pouvons montrer ce fait important qu'une dynamo-série ne s'amorce que sur un circuit modérément résistant : nous fermons le circuit de notre machine sur *une* lampe

à incandescence unique, de voltage approprié : la lampe ne s'éclaire pas. Formons ensuite un second circuit par un nombre convenable n de lampes semblables mises en dérivation (la résistance actuelle est la n^e partie de l'ancienne) ; la machine s'amorce et toutes ces lampes s'allument.

La dynamo-série présente quelques propriétés particulières que nous devons examiner :

1° L'amorcement exige que l'on tourne toujours l'induit dans le même sens. En général il n'y a pas à craindre un renversement de marche du moteur. Mais supposons cette circonstance réalisée ; sous l'influence du magnétisme rémanent, l'induit engendre en tournant un peu d'électricité mais en sens contraire du courant ordinaire. Ce flux électrique va aux inducteurs et, en raison de sa direction, agit pour annuler le magnétisme rémanent au lieu de le renforcer. La machine ne peut donc s'auto-exciter.

2° Pour régler le courant d'une machine série, on place, sur le circuit, des rhéostats que l'on manœuvre de manière à ajouter ou à retrancher des résistances suivant les cas. Un tel moyen n'est actif que si on fait usage de fortes résistances R mais alors le conducteur consomme, en pure perte, une grande quantité d'énergie

$$RI^2$$

3° Si elle doit servir à charger des accumulateurs ou à faire toute autre opération électro-chimique, la dynamo-série a besoin d'être connue à un nouveau point de vue.

D'abord dans le cas spécial des accumulateurs, on ne peut mettre immédiatement la batterie sur le circuit de la machine. En effet si l'on disposait les communications : pôle + de la dynamo et pôle + des accumulateurs et de même pour les deux pôles négatifs, le courant des piles secondaires se déchargerait immédiatement à travers les inducteurs et l'induit de la machine. Cette décharge inverserait les deux pôles malgré le magnétisme rémanent, et ce changement de polarité aurait pour effet de renverser le courant produit ; le nouveau sens concorderait alors avec celui qui a été marqué sur

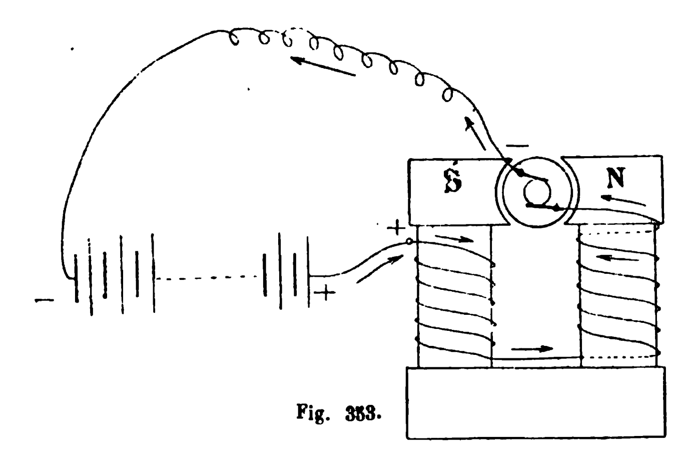


Fig. 353.

la figure 353 ; de sorte que la marche du moteur et de la dynamo, loin de charger les couples, leur soutirerait de l'électricité d'une façon continue. Pour employer la dynamo

à la charge, il faut d'abord la faire marcher sur une résistance faible r (fig. 354); elle s'amorce et prend un certain voltage; quand cette valeur atteint la force électromotrice de la batterie, on établit les connexions et on supprime ensuite le fil r.

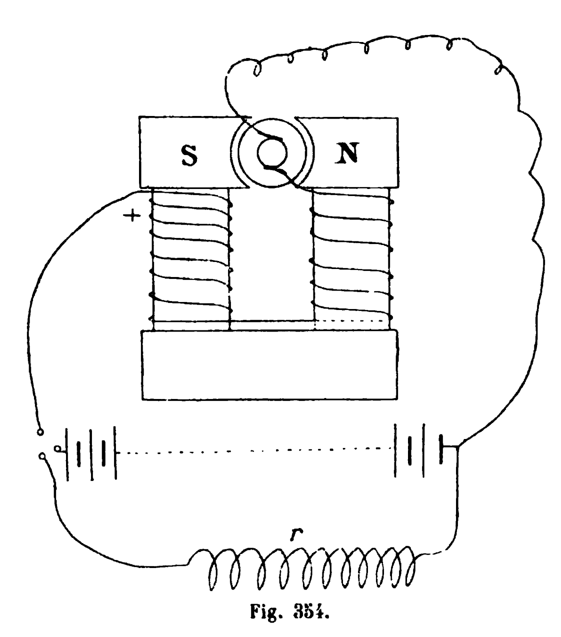


Fig. 354.

La charge continue tant que la f. é. m. de la dynamo dépasse celle des accumulateurs et le courant est d'autant plus intense que la différence est plus grande. Mais ordinairement le voltage ne se maintient pas constant : les causes de variation sont multiples et la diminution de vitesse du moteur est une des principales. Admettons que la vitesse décroisse; la force électromotrice varie dans le même sens et peut descendre au-dessous de celle des accumulateurs. Alors le courant change de sens, il devient ce qu'il était figure 353 : les accumulateurs se déchargent; cela inverse les pôles et le courant débité contribue à la décharge. A partir de cet instant la machine soutire aux accumulateurs une quantité d'électricité d'autant plus grande que l'allure de la dynamo est plus vive.

Cette propriété montre qu'une telle installation ne doit jamais être abandonnée à elle-même : un coupe-circuit automatique (disjoncteur) est indispensable pour éviter le renversement du flux électrique.

3° **Excitation en dérivation**. — Le courant qui alimente les inducteurs est pris entre les deux bornes de la dynamo, c'est-à-dire dérivé sur le circuit principal; son intensité doit être une fraction assez faible de celle du courant utilisé, d'où la nécessité de donner à la résistance des bobines inductrices une grande valeur; on forme donc ces enroulements de fil *long* et *fin* et, de cette manière, si on diminue l'intensité, on accroît le nombre de spires : NI prend alors la valeur voulue. La dynamo en dérivation se reconnaît donc extérieurement au fil mince de ses inducteurs.

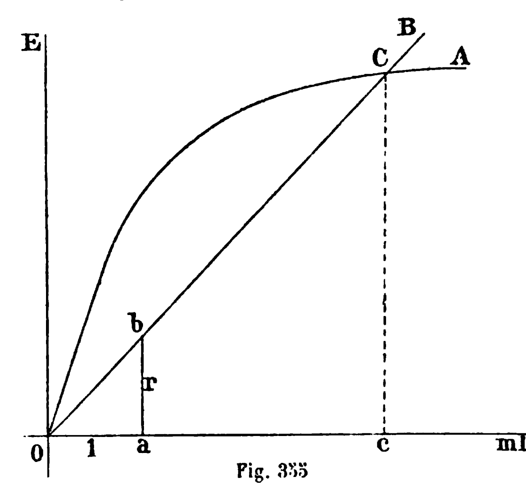


Fig. 355

Caractéristique à circuit ouvert. — Cette courbe (fig. 355), déterminée au moyen

d'une excitation indépendante, est identique à celle de la machine en série. Elle va nous permettre de fixer le régime de fonctionnement de notre dynamo, s'excitant elle-même et à circuit ouvert. En effet appelons r la résistance d'*une spire* inductrice; la résistance totale des bobines est mr et, puisque l'intensité qui les traverse est I, nous avons, entre les deux extrémités du circuit inducteur, une différence de potentiel

$$rm\,\mathrm{I}$$

qui doit égaler la force électromotrice de la dynamo quand les inducteurs sont placés en dérivation ; on doit donc avoir

$$\mathrm{E} = rm\mathrm{I} \tag{1}$$

De par cette équation, E est donc fonction de I.

D'autre part on a

$$\mathrm{E} = f(\mathrm{I}) \tag{2}$$

relation représentée par la caractéristique OA.

La résolution du système d'équations (1) et (2) nous donnera donc les valeurs de E et de I correspondant à la marche à vide. Remarquons que (1) est représentée par la droite OB, de coefficient angulaire r; la rencontre des deux lignes, soit le point C nous fournit donc Cc, f. é. m. de la dynamo à circuit ouvert, Oc étant d'ailleurs l'intensité du courant qui circule alors dans les bobines inductrices.

Réciproquement si on se donne Cc ou E à vide, la résistance de chaque spire ou encore la section du fil à employer est fixée, mais il reste à déterminer le nombre de ces spires, lequel n'influe pas directement sur la force magnétomotrice comme il est facile de s'en rendre compte [1]. Pour fixer m on envisage la perte de puissance dans l'excitation : plus les spires sont nombreuses et plus on réduit cette perte.

Caractéristique externe.— On peut assez facilement obtenir le tracé de cette ligne au moyen de la précédente et de la courbe (fig. 351) donnant la perte de tension due à la réaction de l'induit.

Cette caractéristique, qui nous donne e aux bornes en fonction de l'intensité i du courant extérieur :

$$e = f(i),$$

est représentée fig. 356.

On remarque que le tracé part d'un point A d'ordonnée maxima telle que OA (fig. 356) égale Cc (fig. 355) différence de potentiel quand la machine fonctionne à circuit ouvert.

La courbe se rapproche de plus en plus

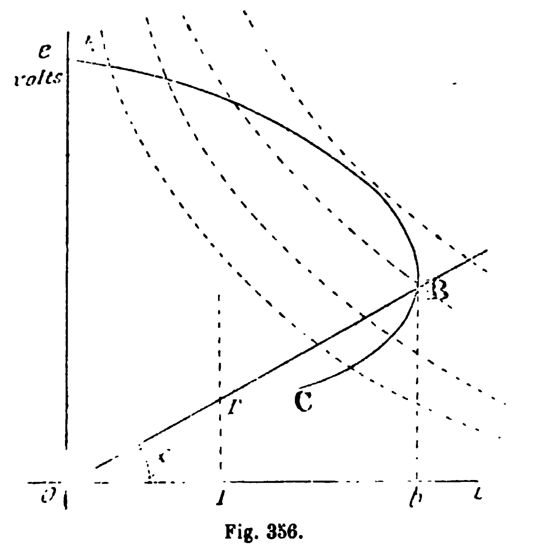


Fig. 356.

(1) En effet, E est fixé donc I est *inversement proportionnel* à la résistance des bobines c'est-à-dire à m; il en résulte que m I est constant, indépendant de m.

de l'axe des i mais, elle comprend deux parties distinctes : dans la première AB l'intensité augmente jusqu'à un maximum Ob ; dans la seconde BC l'intensité diminue et l'on voit cette partie de la caractéristique se diriger vers l'origine des coordonnées.

De l'examen de la courbe nous tirons les conséquences suivantes :

1° La dynamo en dérivation s'amorce à vide, résultat que nous avons déjà obtenu. D'ailleurs nous pouvons rapprocher le cas de celui d'une machine-série ; en effet, à circuit ouvert, la dynamo-shunt est fermée sur ses inducteurs ; elle réalise donc le type série et l'amorcement se produit à la condition que la résistance des bobines soit inférieure à la valeur critique, ce qui a généralement lieu.

2° Supposons la machine en fontionnement à la vitesse qui a permis de relever la caractéristique. On l'utilise généralement entre le régime du point A et un autre plus ou moins éloigné qui dépasse rarement B, car au delà de ce point, la force électromotrice et surtout l'intensité diminuent rapidement et la dynamo se désamorce.

Remarquons d'ailleurs que le maximum de puissance est obtenu dans ces conditions comme l'indiquent les hyperboles (fig. 356) correspondant à des puissances de plus en plus considérables à mesure que les courbes s'écartent de l'origine.

Le point A correspond à la résistance infinie, c'est-à-dire au circuit ouvert. Si nous fermons la machine sur une résistance donnée, la construction connue (voir page 340) nous conduit à un point compris entre A et B et d'autant plus voisin de ce dernier que la valeur de R est plus petite. Dans ces conditions et à mesure que nous diminuons la résistance, nous voyons que le débit croît, mais le voltage diminue de AO à Bb. Nous énoncerons donc la loi :

Dans les dynamos en dérivation, le voltage décroît quand on augmente le débit.

La décroissance est même assez rapide. C'est là un défaut de ce genre d'excitation. Remarquons que cette modification de la tension avec l'intensité est l'inverse de celle qui a été observée dans les machines en série entre certaines limites.

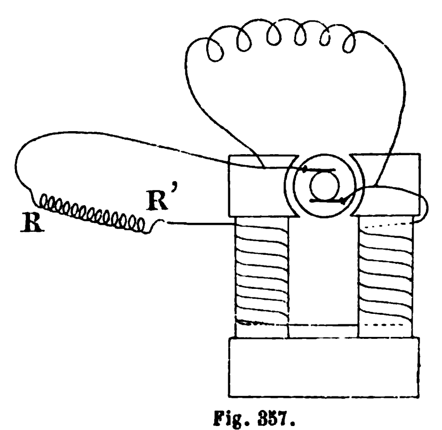


Fig. 357.

Nous pouvons comparer les autres propriétés de l'excitation en shunt à celles des dynamos en série.

1° *Régulation.* — Elle est facile car il suffit d'intercaler un rhéostat RR′ réglable sur la dérivation des inducteurs (fig. 357). Soit R la résistance ajoutée ainsi. La résistance totale de la dérivation devient

$$mr + R$$

en appelant toujours r celle d'une spire et m le nombre des tours.

Reprenons alors la fig. 355 représentant la caractéristique à circuit ouvert. La chute

E de potentiel dans la dérivation est reliée maintenant à l'intensité I des inducteurs par la formule

$$E = I\,(mr + R)$$

ou

$$E = mI\left(r + \frac{R}{m}\right)$$

Il en résulte que le coefficient angulaire de la droite OB représentative de

$$E = f(mI)$$

devient

$$r + \frac{R}{m}$$

au lieu de

$$r$$

La droite OB se relève et le point C correspond à une nouvelle valeur de E, à circuit ouvert, d'autant plus petite que la résistance introduite est plus considérable. On peut aussi construire les caractéristiques externes qui correspondent à diverses valeurs de R et l'on obtient ainsi les tracés ci-contre 1, 2, 3, 4 (fig. 358) qui se rapportent à des grandeurs croissantes R_1, R_2, R_3 et R_4 de la résistance du rhéostat.

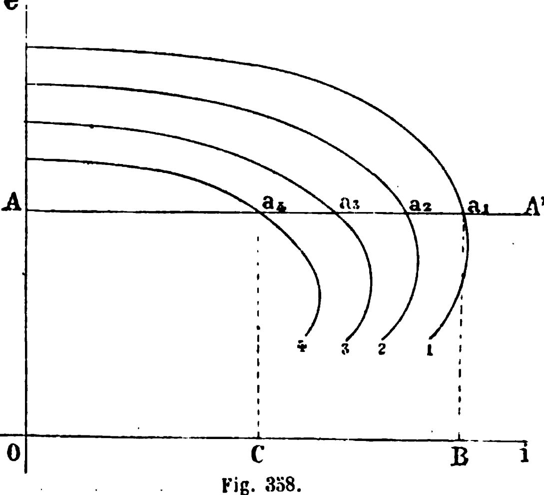


Fig. 358.

Cette figure nous permet de résoudre le problème suivant :

Maintenir constant le voltage aux bornes, soit OA, *pour un débit variable de* OC à OB.

Menons la droite horizontale AA′ correspondant à la différence de potentiel fixée OA ; cette ligne coupe les quatre courbes 1, 2, 3 et 4 en des points a_1, a_2, a_3 et a_4 ; il en résulte que, pour obtenir le débit OB sous le voltage donné, il faut employer la résistance R_1 ; si l'on veut OC, on introduit la résistance R_4 et, pour des débits intermédiaires, nous employons la série comprise entre les deux limites.

2° *Charge des accumulateurs et opérations électrochimiques.* — Soit en particulier le cas des accumulateurs ; les dynamos en dérivation conviennent.

En effet l'*amorcement* est *possible* directement : il suffit de relier la batterie et la dynamo par leurs pôles de même nom dès que le voltage de la machine dépasse celui des couples secondaires ; le conducteur employé avec les dynamos en série est ici absolument inutile.

La figure 359 montre la charge normale de la batterie ; on voit le sens de l'électricité

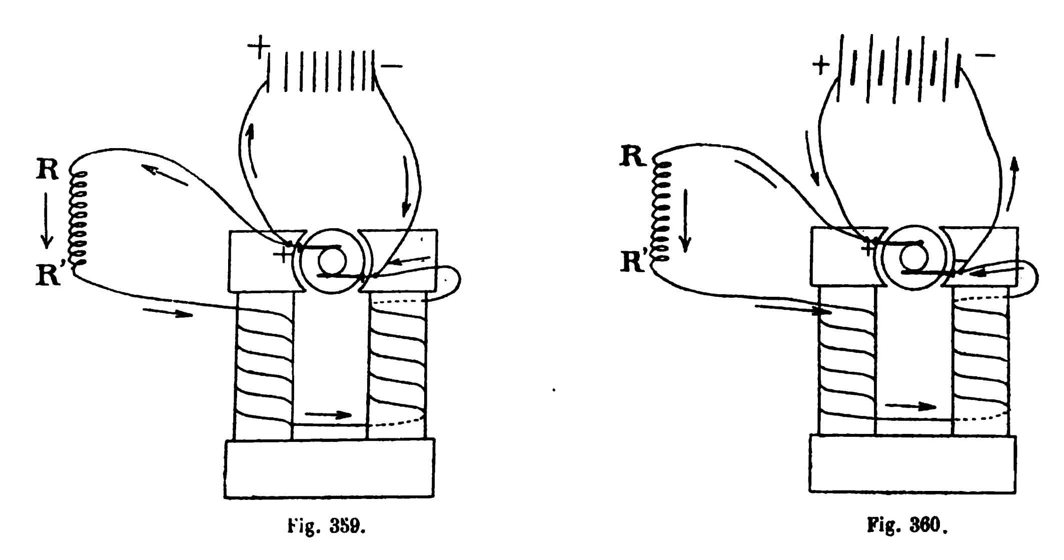


Fig. 359. Fig. 360.

dans les inducteurs et dans le circuit extérieur. Quant à l'intensité de ce dernier courant, elle est proportionnelle à la différence des f. é. m. de la dynamo et de la batterie d'accumulateurs.

Les variations de tension sont dès lors accusées non seulement au voltmètre mais encore à l'ampèremètre. Si les deux tensions viennent à s'égaler, le courant cesse ; il reprend ensuite, mais de sens contraire, si le voltage de la machine continue à baisser (par suite d'un ralentissement du moteur par exemple). Dans ce cas, la figure 360 montre le sens de l'électricité qui correspond à la *décharge* des couples; l'induit est bien traversé par un courant opposé au courant normal, mais les inducteurs ont toujours le même flux électrique ; leurs pôles ne changent pas de place. Ils sont simplement renforcés par ce courant de décharge et permettent alors à la dynamo, qui continue toujours à tourner, de reprendre son voltage et de poursuivre ainsi la charge des piles secondaires.

Le passage contraire dans l'induit n'est donc que temporaire et une seule chose est à craindre : l'échauffement du fil et la détérioration de l'isolant. C'est pourquoi on doit installer, sur le circuit des accumulateurs, un *disjoncteur* automatique qui coupe le conducteur au moment où le courant va changer de sens. L'appareil est quelquefois en outre capable de rétablir ensuite les communications dès que le voltage de la machine a repris sa valeur ; c'est alors un *conjoncteur-disjoncteur*.

3° Les bobines d'une dynamo-shunt présentent une forte self-induction en raison du grand nombre de spires. C'est là un régulateur automatique de l'excitation entre certaines limites. En effet, d'après la loi de Lenz, les variations du courant inducteur sont accompagnées d'extra-courants opposés à la cause. La valeur du flux ne doit donc pas subir grand changement.

4° Excitation compound. — En étudiant les deux modes d'excitation précédents nous sommes arrivés aux conséquences suivantes, vraies entre certaines limites :

1° Dans une dynamo-série, le voltage croît en même temps que le débit ;

2° Dans une dynamo-shunt, le voltage diminue dans les mêmes circonstances ;

Pour maintenir automatiquement la tension invariable malgré le changement de débit, on a pensé à associer les deux modes : deux fils sont enroulés sur les bobines : l'un *ab* pris sur le courant principal *abefd*, est gros et forme un nombre restreint de tours (fig. 361) ; un autre fil *acd* est fin et long ; c'est une dérivation prise entre les balais.

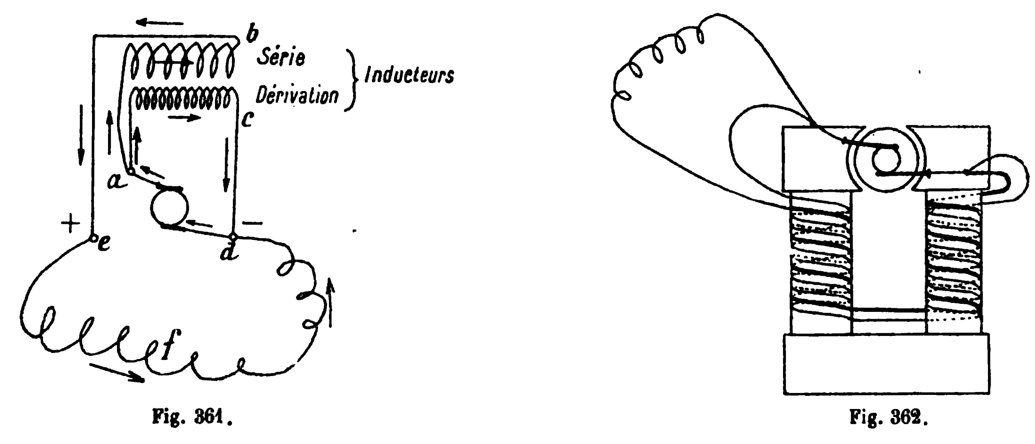


Fig. 361. Fig. 362.

La machine, avec ses deux enroulements, présente la disposition (fig. 362).

La portion des bobines *en série* avec le courant principal peut être considérée comme additionnelle ; elle a pour but de relever le voltage qui tend à baisser quand la machine débite, et la considération des caractéristiques nous donne facilement les ampères-tours supplémentaires. En effet soit (fig. 363) la caractéristique à circuit ouvert. Le voltage aux bornes et à vide étant AA′, nous nous proposons de maintenir cette différence de potentiel quand nous atteindrons le débit maximum *i*. A vide, les ampères-tours inducteurs nécessaires sont représentés par l'abscisse OA′ ; ils sont fournis par le courant dérivé et, si E se maintient constant, ces ampères-tours dérivés ne changent pas quand la dynamo débite. Prenons maintenant la courbe de la figure 351 et déterminons sur elle la chute ε de tension correspondant au débit *i* ; portons cette valeur, soit A*a* à la suite de AA′ (fig. 363) ; nous obtenons le voltage total soit A′*a* que la machine devrait donner à vide ; menons la droite *aa*′ horizontale et nous déterminons le point B d'où les ampères-tours nécessaires OB′ au moment du maximum d'intensité. A cet

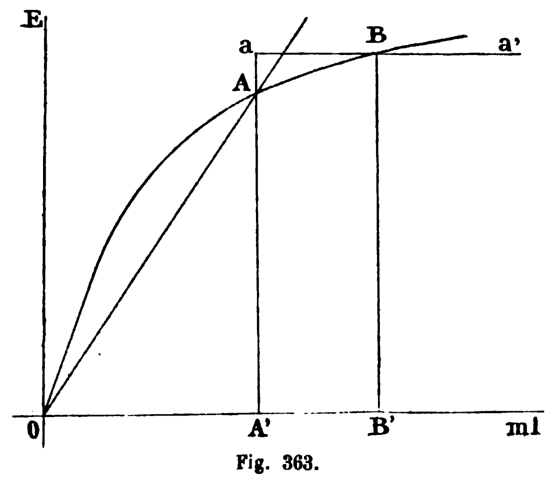


Fig. 363.

instant le supplément est donc A'B' et si on appelle x le nombre de spires à enrouler, on a

$$A'B' = x \times i$$

d'où

$$x = \frac{A'B'}{i}$$

Pratiquement on détermine ce nombre x en enroulant au-dessus du fil dérivé un nombre arbitraire n de spires et en faisant passer dans ce bobinage provisoire un courant variable ; soit i' l'intensité nécessaire, au moment du débit limite, pour obtenir la compensation, les ampères-tours demandés sont alors

$$n \times i'$$

et l'on a

$$n \times i' = x \times i$$

d'où

$$x = n \times \frac{i'}{i}$$

D'après cela le voltage est le même à vide et pour l'intensité fixée mais dans l'intervalle, la tension peut s'écarter légèrement de celle que l'on désire. Dès lors la caractéristique externe, qui devrait théoriquement être une droite horizontale, s'écarte un peu de cette forme tout en passant par deux points d'ordonnées égales pour $i = 0$ et pour $i =$ maximum.

Ce mode d'excitation s'impose dans deux cas surtout : dans une installation d'éclairage par incandescence, d'importance secondaire, et pour des usages spéciaux tels que la traction.

1° Pour l'éclairage par incandescence, il est de toute nécessité de maintenir le voltage invariable malgré l'allumage ou l'extinction de quelques foyers, et si l'on veut éviter la présence continuelle d'un électricien pour la manœuvre du rhéostat, on peut demander la régulation à une dynamo compound.

2° Dans le cas de la traction, les variations de potentiel sont trop considérables et trop fréquentes pour que l'on puisse songer à les neutraliser mécaniquement ; on a encore recours à la machine compound.

5° **Excitation hypercompound**. — Ce n'est qu'un cas particulier de l'enroulement précédent et voici à quoi il se rapporte : l'utilisation de l'énergie électrique n'a pas lieu immédiatement entre les bornes de la dynamo mais à une certaine distance, et les fils qui établissent la communication provoquent une chute de tension.

Cette chute, suivant la loi d'Ohm, est le produit de la résistance R des conducteurs, par l'intensité transportée I, soit $e = RI$.

Or, d'un instant à l'autre le débit change ; la perte de potentiel varie proportionnellement à cette intensité, et il en résulte qu'une dynamo compound ne satisfait nullement dans ce cas :

Soit en effet E le potentiel maintenu constant entre les bornes de la machine. Quand le débit est I, il reste, au point d'utilisation, un voltage

$$E - RI$$

qui diminue quand le débit augmente (propriété identique à celle que nous avons constatée dans le cas des machines en dérivation quand on utilise le courant immédiatement entre les bornes).

Si l'on veut un *voltage utilisable constant*, on doit remplacer E par une valeur variable x telle que

$$x - RI = C$$

C étant invariable.

Dès lors il vient

$$x = C + RI$$

la tension x entre les bornes *doit donc croître avec l'intensité*; pour cela on augmente encore les ampères-tours supplémentaires de l'enroulement compound et l'on obtient l'excitation *hypercompound* ou *surcompound*.

La caractéristique externe d'une telle machine est représentée (fig. 364). Théoriquement c'est une droite AB de coefficient angulaire égal à la résistance R des fils qui relient la machine au point d'utilisation. Et, en effet, la perte de tension dans la ligne, pour un débit i, par exemple, est

$$i \times R$$

soit Bb' pour $i = 0f$; le voltage utile est donc fb' soit OA ; il est par conséquent invariable.

Fig. 364.

On conçoit facilement (voir page 355) le moyen de calculer les ampères-tours supplémentaires ; on fait usage d'un graphique analogue à celui de la figure 363 en ajoutant à Aa la valeur de la chute de potentiel dans la ligne.

Le système est ordinairement adopté dans la traction électrique.

Dans les stations centrales pour la lumière et lorsque l'usine est à une certaine distance des appareils, on préfère souvent à ce mode la disposition *en dérivation* avec rhéostat de régulation manœuvré à la main ou automatiquement. Le voltmètre de réglage V (fig. 365) ou l'appareil automatique qui le remplace est alors impressionné par deux fils AV et BV revenant à l'usine.

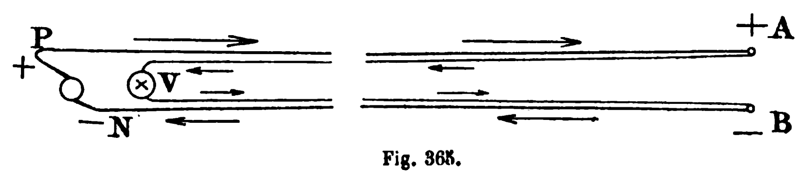


Fig. 365.

Ces fils peuvent être très fins, car leur résistance, même dans ce cas, est faible vis-à-vis de celle du voltmètre ; ce sont les *fils pilotes*. Souvent ils sont logés sous le même

isolant que les câbles principaux PA et BN; mais, au point de vue électrique, on doit bien entendu, éviter toute communication des fils pilotes et des conducteurs.

Différentes formes des inducteurs. — *A priori* on peut en distinguer deux classes suivant le nombre des pôles :

1° Les uns, comme ceux que nous avons examinés jusqu'ici, sont constitués par deux pôles seulement, l'un Nord, l'autre Sud. Ces inducteurs sont dits *bipolaires.*

2° Les autres présentent un nombre plus grand et toujours pair de pôles, 4, 6, 8, etc.; ce sont les inducteurs *multipolaires.*

Mais dans ces deux catégories, les formes particulières sont nombreuses et, pour pouvoir les étudier, nous devons dire dès maintenant que l'induit n'est pas toujours semblable à celui que nous avons examiné comme type. A cet induit :

1° *Annulaire*, il faut ajouter les induits :

2° *A tambour* où le fil est disposé suivant les génératrices d'un cylindre magnétique allongé ;

3° *A disque*, le fil est mis à plat, et suivant un mode convenable, sur un plateau qui tourne autour de son axe dans un champ magnétique;

4° *A anneau aplati.* Cette forme diffère de la forme annulaire proprement dite en ce que, dans cette dernière, la partie utile à l'induit est disposée suivant les génératrices — nous ajouterons même *extérieures* (voir page 377) — de l'armature; tandis que dans l'*anneau plat*, ces portions qui longent les génératrices sont réduites à zéro et les portions utiles sont *radiales*.

Inducteurs bipolaires. — Dans les dynamos qui en sont pourvues, les induits sont ou *annulaires* ou à *tambour*, et la forme des inducteurs ne dépend pas essentiellement de cette nature.

On peut diviser les inducteurs bipolaires en deux classes, suivant la nature du circuit magnétique :

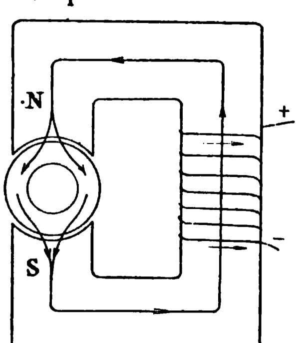


Fig. 366.

1° Machines à circuit magnétique unique ;

2° Machines à circuit magnétique double.

1° *Machines à circuit magnétique unique.* — Ce circuit unique peut d'ailleurs être obtenu :

a). Par une seule bobine.

b). Par deux bobines.

a). Inducteurs à circuit unique dû à *une seule bobine.* La figure 366 donne le schéma du circuit; on y voit, d'après le sens du courant dans la bobine unique, la direction des lignes de force et la formation de deux pôles opposés en N et en S.

b). Inducteurs à circuit unique dû à *deux bobines.* — L'ensemble est celui que nous avons toujours pris comme type jusqu'ici; c'est un électro-aimant, mais cet électro peut être placé de deux manières différentes:

1° Comme l'indique la figure 344 en particulier, et alors nous avons l'induit à la partie *inférieure* : la machine est dite du *type inférieur*.

2° Comme le montre la figure 345 ; l'induit est en haut ; la dynamo est du *type supérieur*.

Examinons séparément ces deux sortes de machines.

Dans le *type inférieur*, l'armature *mobile* occupe la partie inférieure ; il en résulte une réduction de la hauteur des paliers et une grande stabilité. En outre l'armature tend à être soulevée par suite d'une dissymétrie dans la disposition des lignes de force, lesquelles passent de préférence par la moitié supérieure de l'anneau ou du tambour. Cette action soulage les coussinets.

Mais cette disposition expose à un gros inconvénient, la perte de flux de force par le socle. Pour éviter ces dérivations, il faut interposer un corps non magnétique entre les pièces polaires et le bâti. Ce métal peut être ou le zinc ou la fonte à 12 0/0 de manganèse ou le maillechort.

La figure 367 représente une dynamo *Edison* avec induit à tambour.

Le *type supérieur* présente des avantages et des inconvénients opposés des précédents ; le flux de force ne subit pas les mêmes dérivations que ci-devant, mais on doit, pour assurer à la dynamo une stabilité suffisante, renforcer les supports de paliers, et d'autre part l'attraction électro-magnétique s'ajoute ici à la pesanteur pour augmenter les frottements et fatiguer l'arbre de rotation. Ces deux inconvénients, provenant du défaut de symétrie du champ magnétique, peuvent être atténués par un développement des pièces polaires vers la partie supérieure ; on augmente ainsi la section de l'entrefer dans cette partie et on facilite le passage des lignes de force.

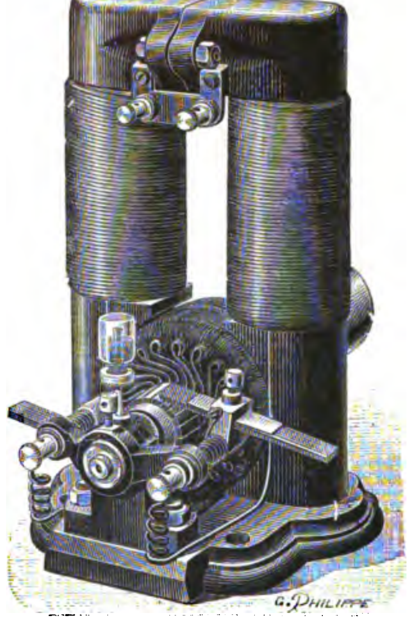


Fig. 367.

Cette disposition est avantageuse au point de vue de la construction, car on peut couler d'une même venue, en fonte ou en acier doux, le socle, la carcasse et les supports de paliers.

La figure 368 représente le type *Gramme* construit pour des puissances variant de 100 watts à 34,5 kw.

Les deux noyaux verticaux sont en fonte et d'une même venue avec la plaque de fondation et les supports des paliers. On voit que ces noyaux se prolongent par des pièces polaires très développées embrassant la presque totalité de l'induit. De cette façon, on obtient un flux à peu près symétrique et l'on fait disparaître les inconvénients relatifs à ce genre d'inducteurs.

L'induit de cette dynamo est annulaire.

On a reproduit (fig. 369) un type de dynamo *Ganz* encore répandu dans la pratique. Ici le socle seulement est en fonte ; les noyaux, en acier doux, sont encastrés dans le

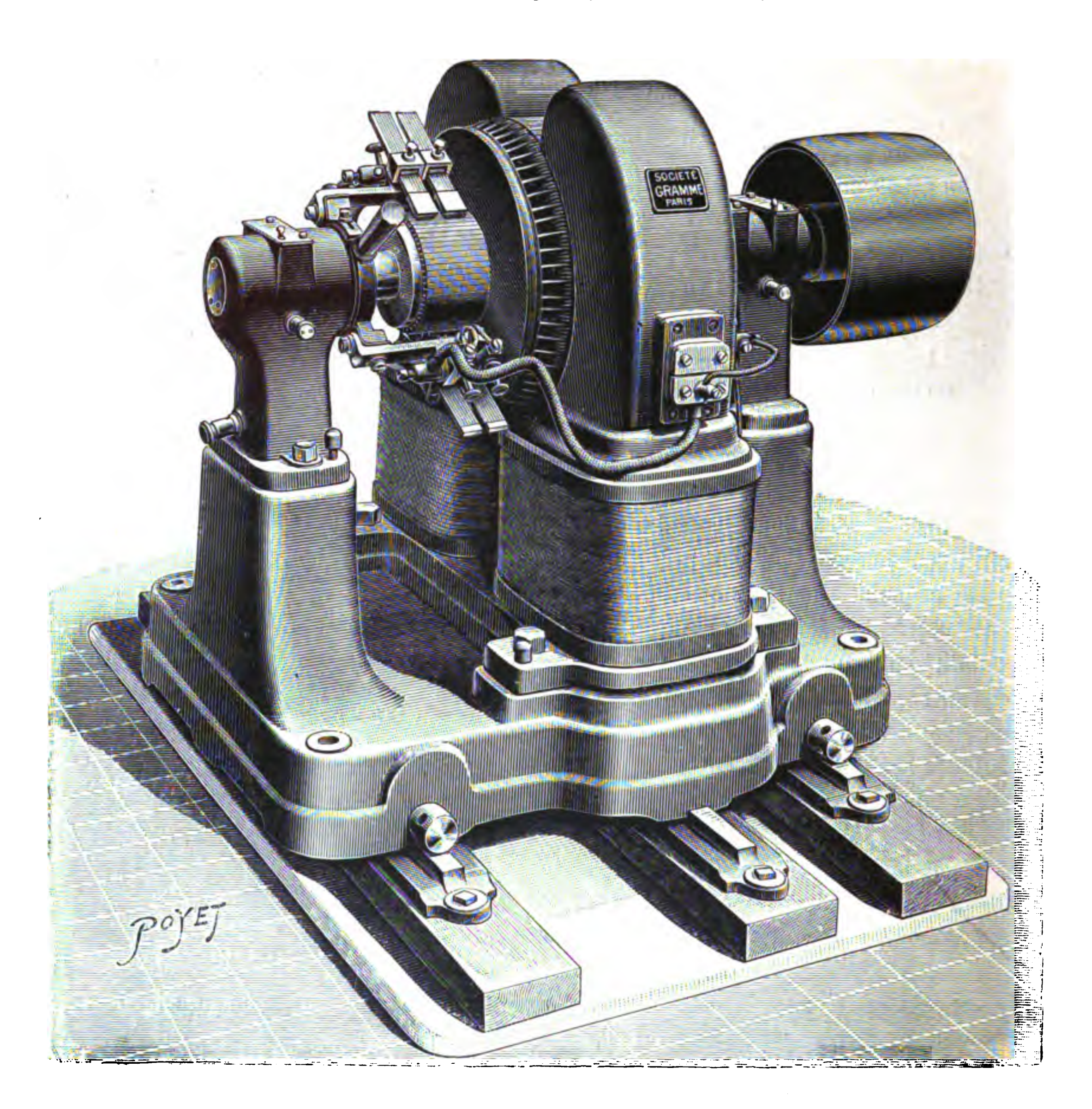


Fig. 368.

bâti au moment même de la coulée. On peut remarquer aussi, sur cette figure, que les paliers sont rapportés et isolés de la plaque de fondation par une semelle non magnétique. Enfin l'induit (que l'on voit allongé) est un tambour.

2° *Machines à circuit magnétique double.* — On se propose surtout, dans ce cas, de rendre parfaitement symétrique le flux qui traverse l'induit. Pour cela les deux

bobines inductrices doivent agir d'une manière concordante, et il y a plusieurs façons de les disposer. Nous considérerons les types principaux suivants :

a). Le type Manchester.

b). Le type cuirassé.

c). Les types Thury.

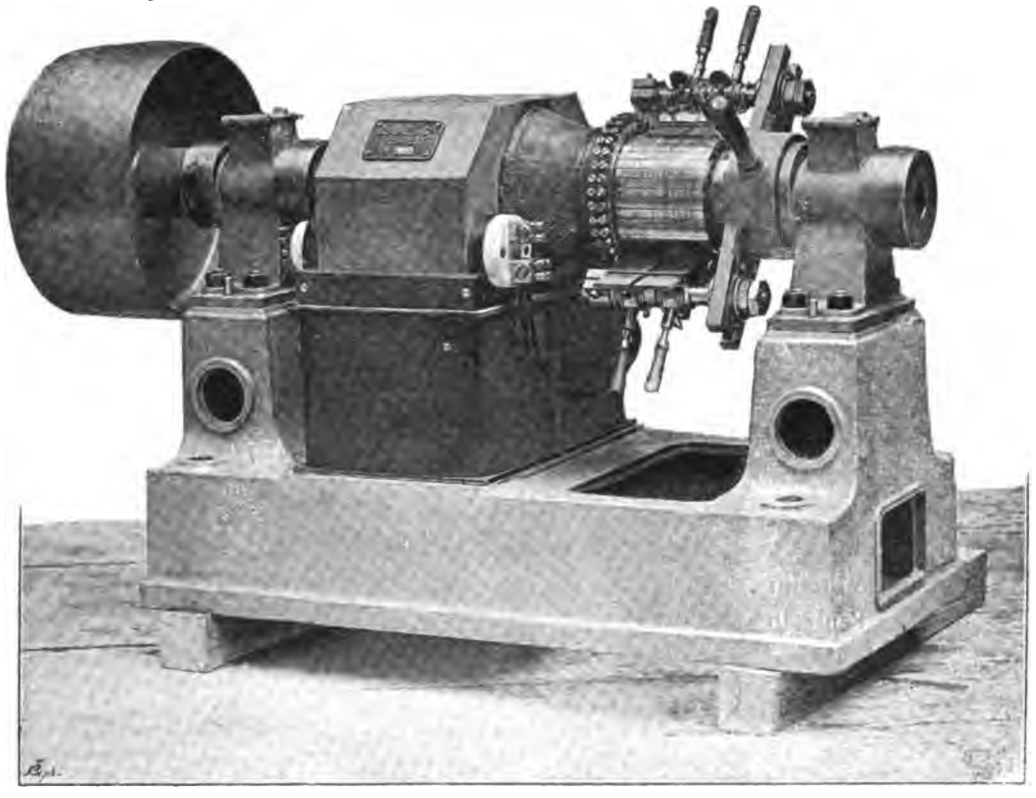


Fig. 369.

a). Type *Manchester*. — Il est représenté (fig. 370) : deux bobines A et B disposées parallèlement sont traversées par des courants de même sens de manière à constituer deux pôles semblables, Nord par exemple, en haut, et deux pôles Sud en bas. Les lignes de force se réunissent donc, comme le montre le schéma, pour pénétrer ensemble dans l'armature par l'intermédiaire des pièces polaires.

Cette disposition réalise la symétrie parfaite, mais, outre qu'elle conduit à une grande dépense d'excitation, elle expose à des pertes de flux par suite du passage de lignes de force directement d'un noyau à l'autre ou d'une extrémité à l'autre du même noyau.

Malgré cela ce mode est souvent utilisé.

On voit (fig. 371) une dynamo *Labour*, construite par la Société l'*Eclairage électrique*. Les deux noyaux sont en fer doux coulé ; ils reçoivent chacun une bobine enroulée sur un manchon métallique qui porte des plaques isolantes pour les bornes de connexion.

Les deux culasses sont rapportées sur les noyaux et le tout est monté sur une plaque de fondation.

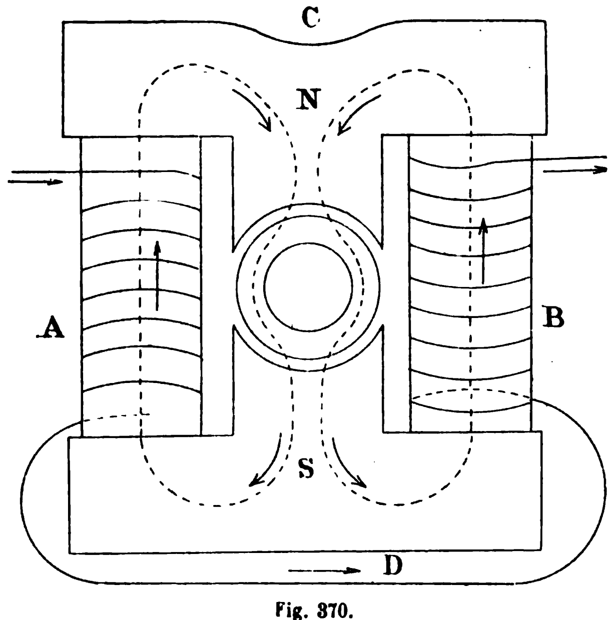


Fig. 370.

La figure montre que les inducteurs sont facilement démontables, ce qui permet une visite aisée de l'induit.

La poulie d'entraînement est représentée en porte-à-faux, mais, dans quelques cas,

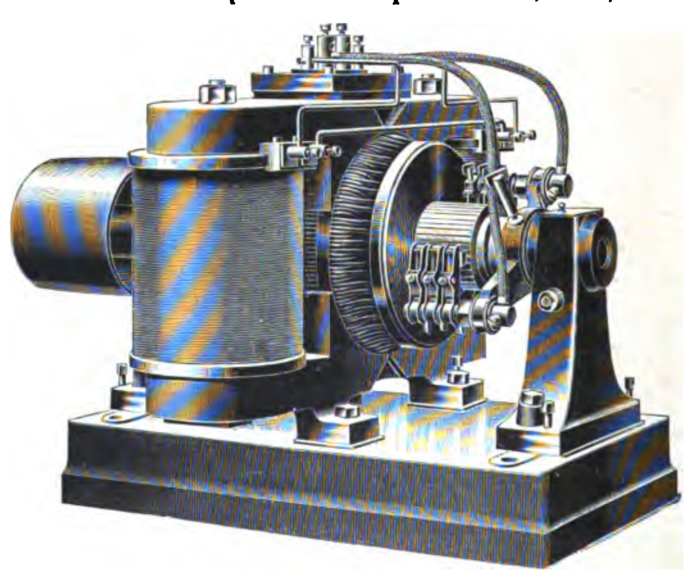


Fig. 371.

on la monte entre deux paliers. Alors le troisième palier est *à rotule*, de manière à permettre un centrage parfait de l'arbre.

On voit encore (fig. 372) une autre machine du type Manchester ; elle est construite

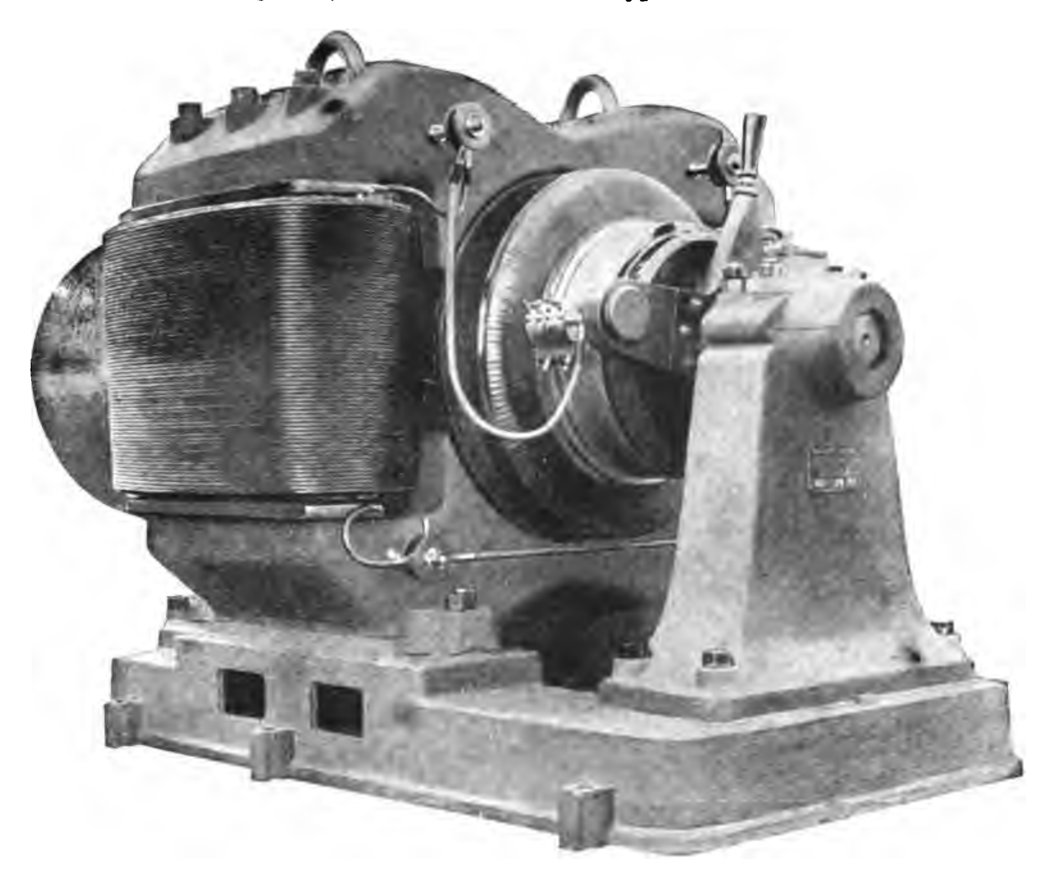


Fig. 372.

par les ateliers d'*Œrlikon* et spécialement dans le but de transporter l'énergie à distance. Nous aurons plus tard à revenir sur cette dynamo que nous présentons dès maintenant uniquement pour la disposition de ses inducteurs.

b). Type *cuirassé*, dit encore de *Lahmeyer*. — Pour diminuer les pertes de flux signalées dans l'inducteur Manchester, on rapproche les bobines de l'armature. Ces bobines A et B (fig. 373) dans le prolongement l'une de l'autre, sont traversées par des courants de même sens et, de cette façon, il se développe deux pôles contraires aux deux extrémités en regard. Les lignes de force passent ensuite d'un bout à l'autre de l'en-

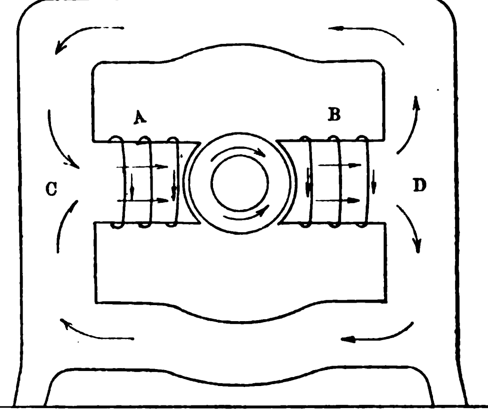


Fig. 373.

roulement A B et se dérivent dans les deux pièces magnétiques C et D. On remarque que les pièces polaires sont fortement réduites dans ce modèle.

La disposition cuirassée prend actuellement une grande importance. Citons, à titre d'exemples :

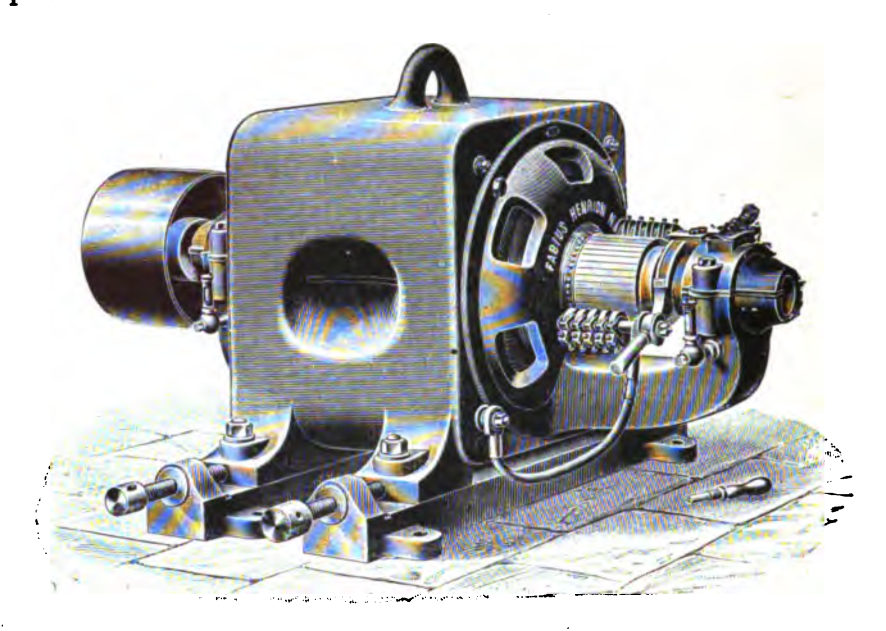


Fig. 374.

Les dynamos *Fabius Henrion* (fig. 374) dont le système inducteur est constitué par une carcasse rectangulaire en fonte, identique à celle de la figure précédente, et deux noyaux venus d'une même coulée avec l'enveloppe. Des évidements diminuent d'ailleurs le poids de la matière. On voit aisément sur ce dessin la disposition des paliers de cette machine *blindée*.

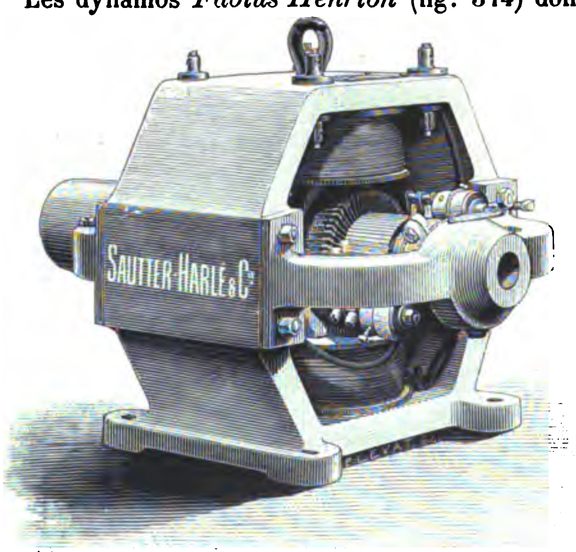


Fig. 375.

La figure 375 nous montre une autre machine cuirassée, de construction *Sautter, Harlé et Cie*. Sa carcasse, en acier moulé, est octogonale et l'arbre de l'induit est soutenu par deux pièces rapportées sur le cadre magnétique.

La petite dynamo des *Ateliers d'Œrlikon* (fig. 376) présente une disposition semblable.

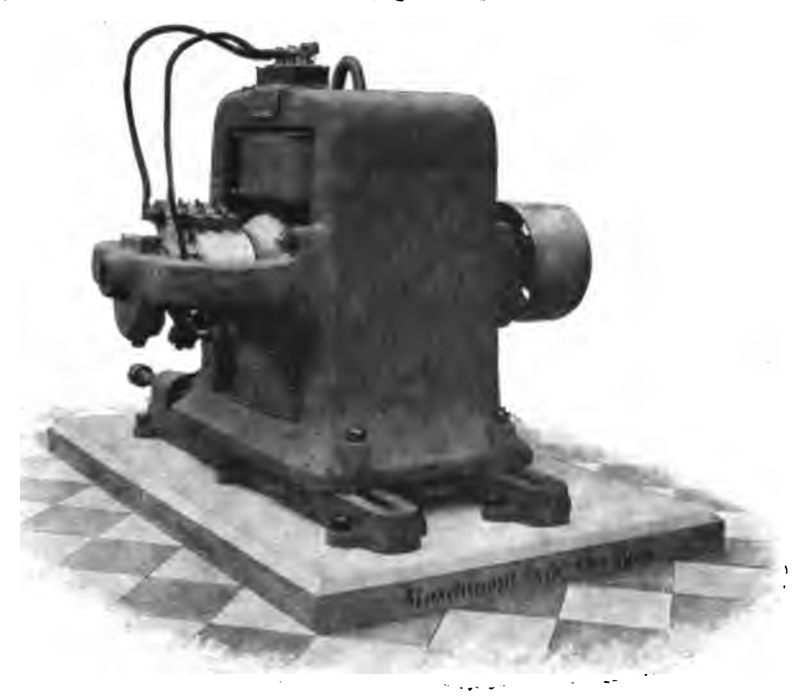


Fig. 376.

Cette forme *cuirassée* de la machine peut d'ailleurs être obtenue par une bobine unique. En effet, si l'on se reporte à la figure 373, on comprend que le circuit magnétique ne change pas de disposition lorsque nous supprimons l'une des bobines A ou B; nous obtenons ainsi une machine *cuirassée* à un seul *pôle bobiné*. Le modèle *Thury*, des *Ateliers du Creusot* (fig. 377) est basé sur ce principe : le circuit magnétique est constitué par un cadre venu de fonte avec la plaque de fondation; le pôle bobiné et le pôle sans enroulement sont tous deux en fer doux et rapportés; l'induit enfin est à tambour.

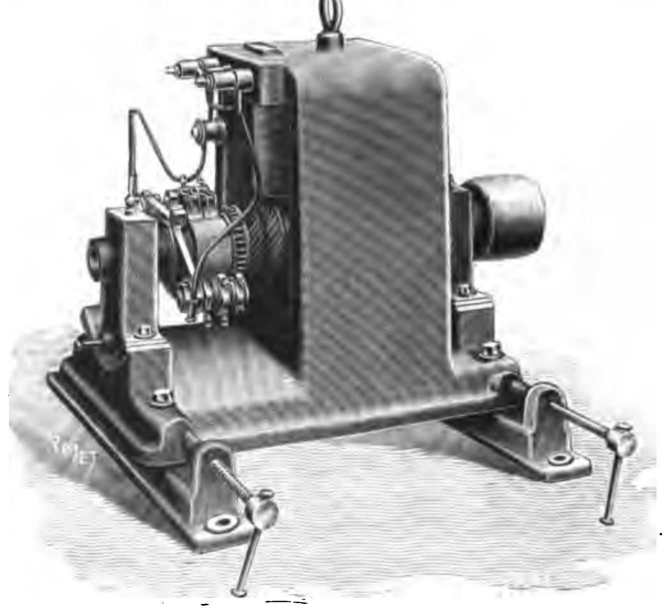


Fig. 377.

Nous voyons (fig. 378) une autre dynamo cuirassée, de la maison *Farcot*, à bobine



Fig. 378.

unique. Une même pièce d'acier coulé constitue le circuit inducteur, le noyau, les pièces polaires et le socle. Il n'y a pas de support spécial pour l'induit et l'encombrement est très faible. Cette forme se prête facilement à l'emploi de cette machine comme moteur électrique.

c). Les types *Thury* sont caractérisés par le partage des bobines magnétisantes ; la figure 379 représente l'ensemble d'une dynamo bipolaire à quatre bobines : deux

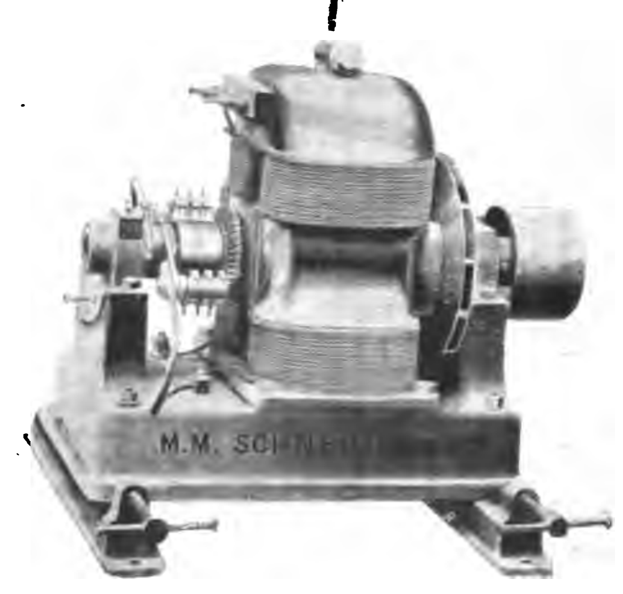


Fig. 379.

enroulements, dans le prolongement l'un de l'autre, sont inverses, de manière à créer,

dans la pièce polaire interposée, un pôle unique ; les deux autres bobines sont contraires des premières et l'on a ainsi deux pôles opposés entre lesquels tourne l'induit (à tambour). On remarquera que cette machine réalise en quelque sorte l'association de deux dynamos, l'une du type supérieur, l'autre du type inférieur.

On l'appelle ordinairement machine à *pôles conséquents*, étant donnée la disposition de ses électros.

Généralement la ventilation des enroulements est assurée par des vides ménagés entre les tôles qui constituent l'armature de l'induit, mais dans le modèle qui nous occupe, on voit un petit ventilateur spécial entraîné par l'arbre de rotation.

La figure 380 se rapporte à un autre modèle *Thury* : deux bobines magnétisantes entourent les noyaux horizontaux supérieur et inférieur et leurs pôles sont semblablement orientés comme l'indiquent les lignes de force figurées. Le flux est reçu dans deux noyaux N et S, comme dans une machine *Manchester*, mais il est renforcé par deux nouvelles bobines disposées d'une manière concordante, en N et en S.

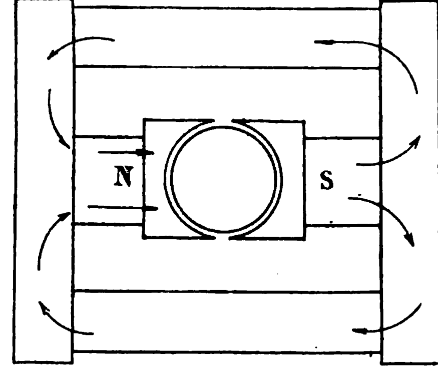


Fig. 380.

Inducteurs multipolaires. — Les inducteurs bipolaires sont employés, d'une manière générale, dans les machines de faible puissance. Dès que l'énergie transformée par la dynamo devient un peu considérable, il faut augmenter le nombre des pôles et l'on trouve alors les avantages suivants :

1° Diminution possible de la vitesse angulaire puisque la distance de deux pôles consécutifs correspond maintenant à un arc inférieur à une demi-circonférence ;

2° Plus grande légèreté de la machine par suite de la réduction des culasses et des pièces polaires ;

3° Diminution des pertes de flux.

Pour établir une classification de ces inducteurs multipolaires, nous aurons d'abord à nous baser sur la forme de l'induit ; nous trouverons ainsi :

1° Des inducteurs pour induits annulaires ou en tambour ;
2° — — en disque ;
3° — — en anneau plat.

Nous ajouterons une quatrième classe :

4° Inducteurs à pôles internes.

1° Inducteurs multipolaires pour induits annulaires ou en tambour. — D'une façon générale, il y a deux manières de disposer ces inducteurs selon que l'on donne à tous les électros :

a). Une culasse commune.

b). Un noyau commun.

a). *Inducteurs à culasse commune.* — Cette culasse unique, sur laquelle tous les noyaux sont montés, peut avoir une forme quelconque, mais nous distinguerons encore deux classes dans cette catégorie : il peut en effet exister autant de bobines magnétisantes que de pôles ou bien il y a des pôles non bobinés.

Examinons d'abord ce dernier cas : machines comprenant *deux fois plus de pôles que de bobines.* La figure 381 donne le schéma de la disposition : la culasse unique est de forme rectangulaire et sur ses petits côtés sont rapportés deux noyaux qui reçoivent chacun une bobine magnétisante. Ces deux enroulements étant de sens contraire, nous obtenons deux pôles semblables en regard, soit N. Quant aux grands côtés de la carcasse, ils présentent des épanouissements S qui constituent, en raison de leur situation, deux pôles S ; il en résulte donc que l'induit, en tournant dans la région centrale, rencontre successivement des pôles alternés.

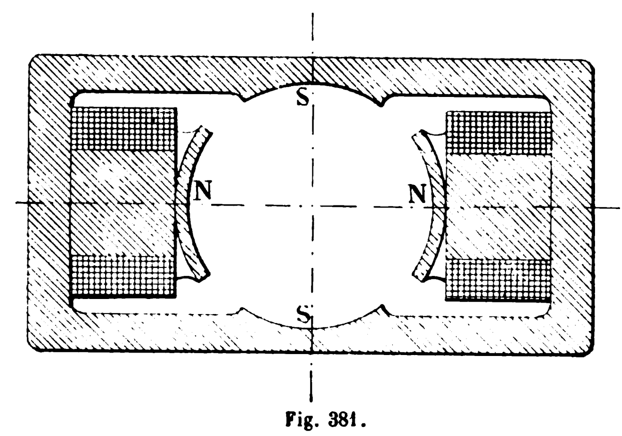
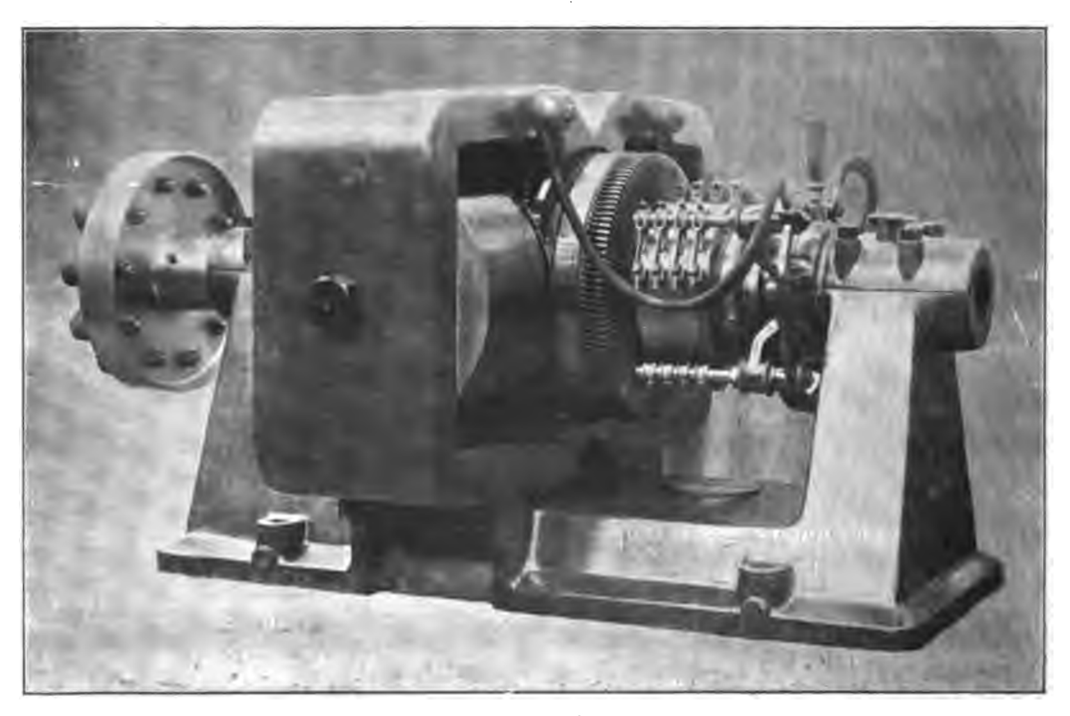


Fig. 381.

On voit (fig. 382) l'ensemble d'une dynamo construite d'après ces principes, par la


Fig. 382.

maison *Brown Boveri et Cie* ; le dessin représente la carcasse fixée à un socle de fonte

qui supporte les paliers ; l'induit y est à tambour. Actuellement ce type est surtout employé quand la dynamo doit servir d'excitatrice à un alternateur de la même maison : la culasse est alors fixée au palier même de la machine alternative tandis que l'induit est monté sur l'arbre de cet alternateur et en porte-à-faux pour éviter un palier supplémentaire (on verra plus tard le dessin d'un tel ensemble).

Nous arrivons maintenant au cas des inducteurs dont tous les pôles sont bobinés : la culasse unique est de forme annulaire ou polygonale. La figure 383 montre la première de ces formes avec quatre noyaux recevant chacun une bobine ; les enroulements sont d'ailleurs alternés quand on passe d'un électro au voisin, de façon à établir des pôles contraires : les circuits magnétiques se ferment alors, comme le tracé l'indique, à travers l'armature de l'induit qui tourne dans la partie centrale.

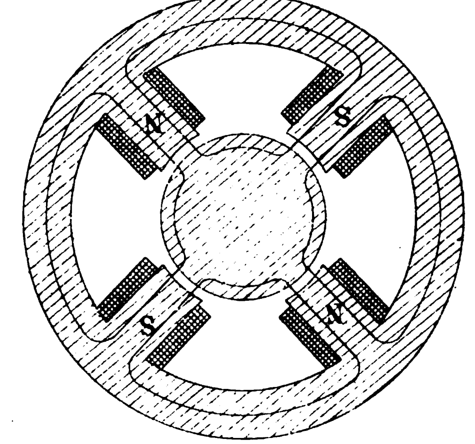
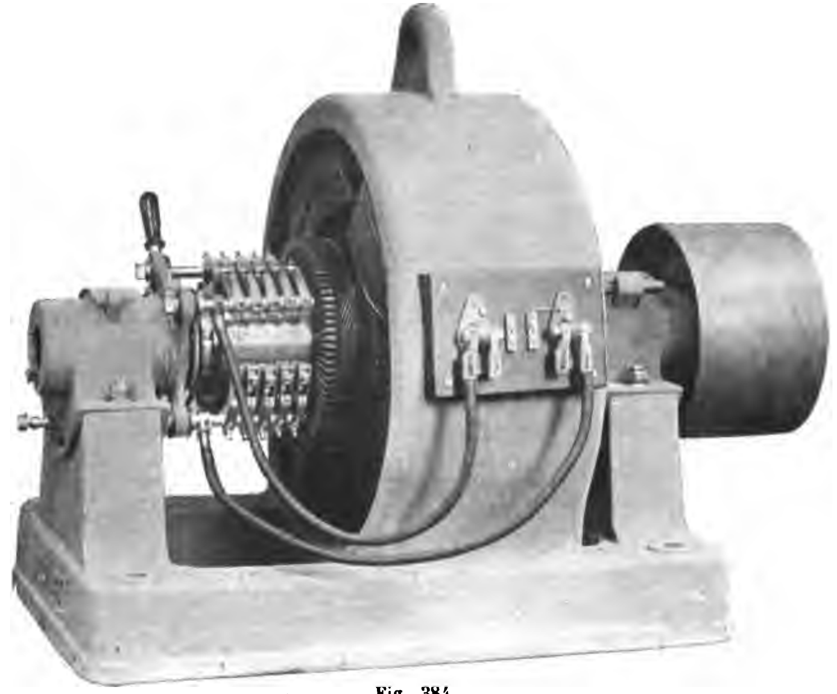


Fig. 383.

C'est cette disposition que l'on adopte dans la plupart des dynamos multipolaires.

A titre d'exemple, nous indiquerons :

1° Une dynamo, représentée par la figure 384, de la *Société Alsacienne* à Belfort.


Fig. 384.

Elle est à quatre pôles et sa culasse en fonte d'une seule pièce, portant ses noyaux, est venue de fonte avec le socle.

2° La figure 385 se rapporte à une dynamo à huit pôles de la *Société d'Œrlikon*



Fig. 385.

(200 kw.). La carcasse d'acier en deux pièces reçoit des noyaux rapportés. Les épanouissements polaires assurent, comme toujours, la situation des bobines magnétisantes.

3° On a figuré (386), un autre genre de dynamo répondant au même type d'inducteurs. C'est une machine de la *Compagnie générale d'Electricité de Creil.* La carcasse est encore en deux pièces, mais de forme hexagonale, pour une dynamo à six pôles. Les noyaux sont venus de la même coulée que les portions de culasse.

4° La figure 387 représente une machine *Sautter-Harlé et Cie* à quatre pôles avec carcasse octogonale sur laquelle sont rapportés les quatre noyaux des électros.

5° Nous voyons enfin (fig. 388) une dynamo de *MM. Schneider et Cie*, dite « type S », construite spécialement pour puissances de 25 à 250 chevaux : l'inducteur, en acier coulé de grande perméabilité, est en deux parties et facilement démon-

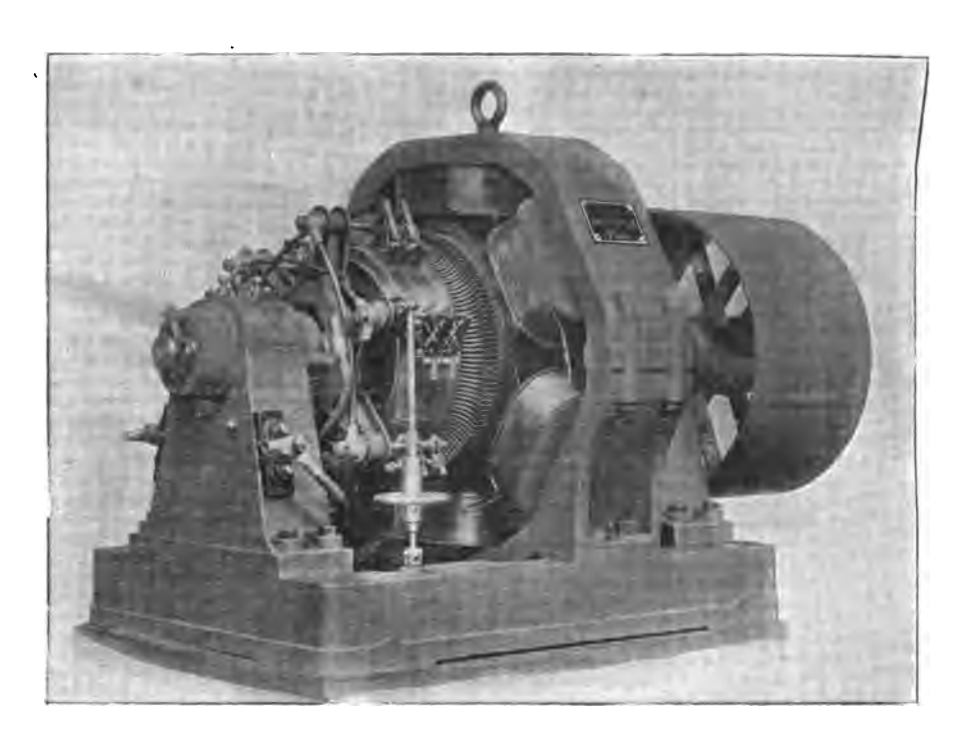


Fig. 386.

SAUTTER-HARLÉ & CIE

Fig. 387.

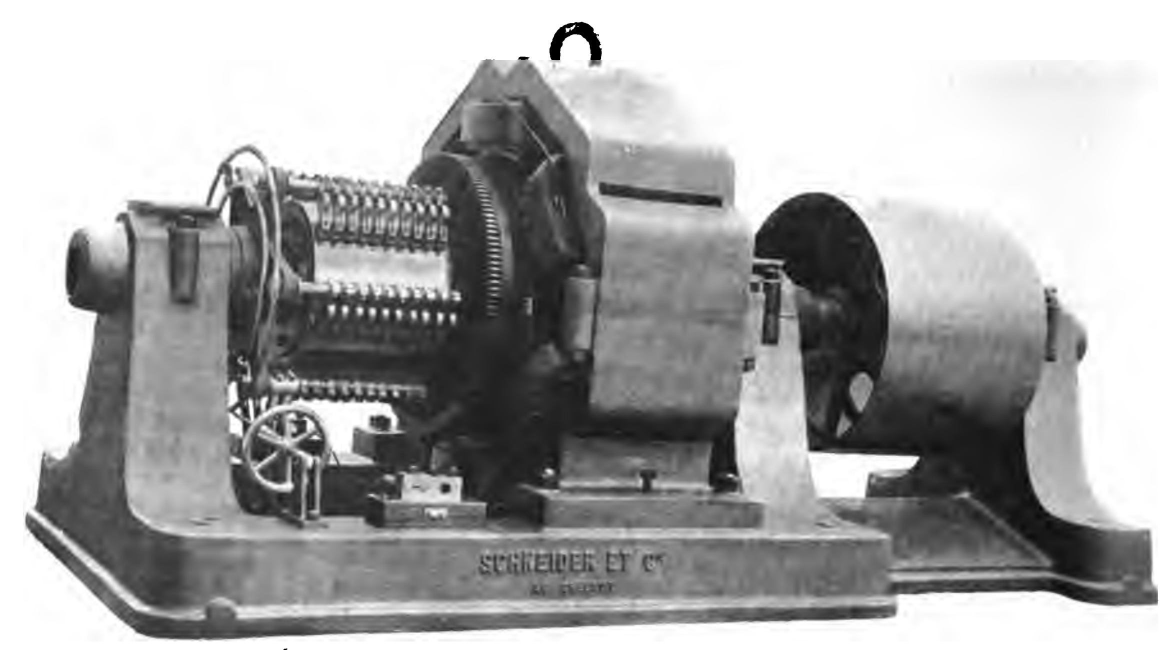


Fig. 388.

Fig. 389.

table pour permettre l'accès de l'induit. Les noyaux polaires venus de fonte avec la carcasse, sont munis de fentes radiales pour diminuer les flux transversaux (voir plus loin *Etude générale complémentaire de la dynamo*).

La disposition de ces inducteurs à culasse unique peut d'ailleurs être différente : la culasse, dans la figure 389, représentant une dynamo hexapolaire Gramme, est constituée par une flasque magnétique fixée au socle de la machine. Sur cette pièce, et perpendiculairement à son plan, se trouvent implantés les six noyaux d'électros. Ces noyaux reçoivent chacun une bobine et se terminent par des pièces polaires assez étendues qui embrassent, comme on le voit, une grande partie de l'induit.

La Société Gramme a d'ailleurs remplacé ce mode, depuis quelques années, par le système d'inducteurs à pôles radiaux.

b). *Inducteurs à noyau unique.* — Il y a généralement autant de bobines que de pôles et ces bobines sont disposées sur une pièce unique, annulaire ou polygonale ; le sens de l'électricité est renversé quand on passe d'une bobine à la suivante, de sorte que les lignes de force, émanant de ces enroulements, se réunissent pour constituer des pôles dans les parties interposées ; ces points reçoivent des pièces polaires comme l'indique la figure 390, laquelle donne aussi la configuration des lignes de force.

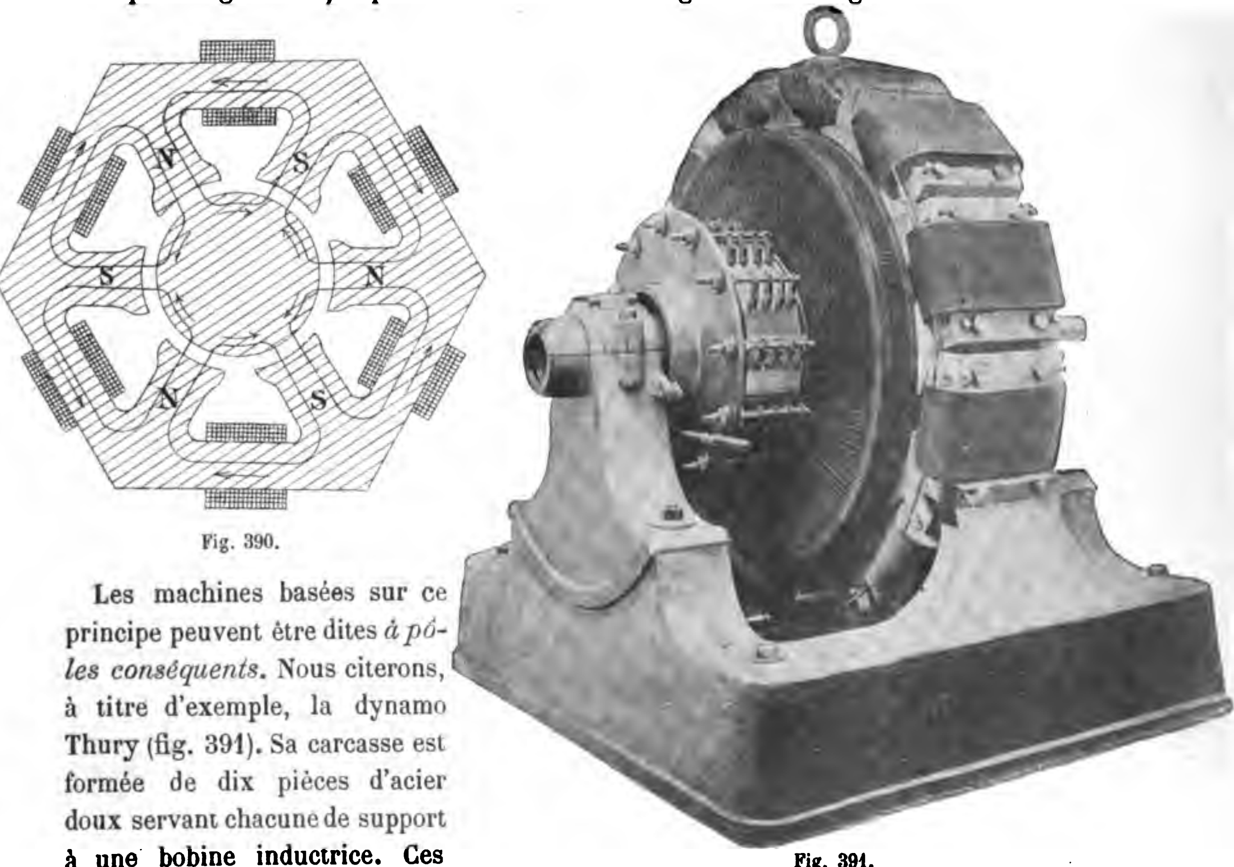


Fig. 390.

Fig. 391.

Les machines basées sur ce principe peuvent être dites *à pôles conséquents*. Nous citerons, à titre d'exemple, la dynamo Thury (fig. 391). Sa carcasse est formée de dix pièces d'acier doux servant chacune de support à une bobine inductrice. Ces portions sont reliées entre elles par les pôles proprement dits, en acier laminé, fixés par

des vis. Un rodage parfait est nécessaire pour éviter les pertes magnétiques, et la réunion de cette culasse au bâti s'effectue par l'intermédiaire d'une semelle de bronze.

2° Inducteurs multipolaires pour induits en disque. — Les inducteurs sont alors disposés en deux couronnes comprenant chacune un nombre pair de bobines enroulées sur des noyaux magnétiques réunis par une culasse ordinairement circulaire qui sert de flasque à l'appareil.

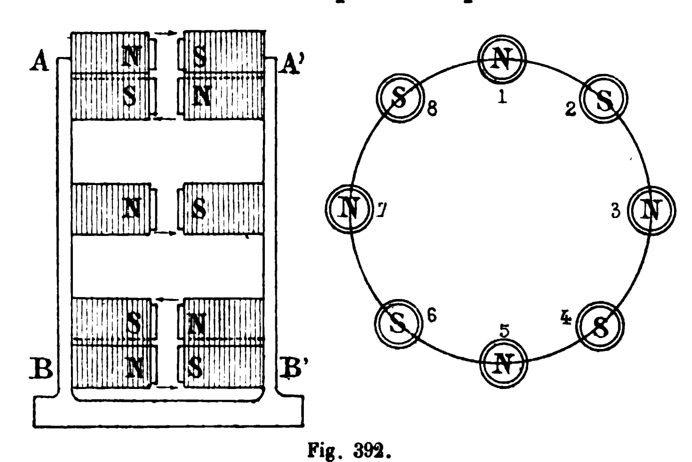


Fig. 392.

Le sens du courant dans deux bobines consécutives est inverse, de sorte que les pôles sont alternativement nord et sud (fig. 392).

D'autre part deux pôles en regard sont aussi contraires et l'on a ainsi des lignes de

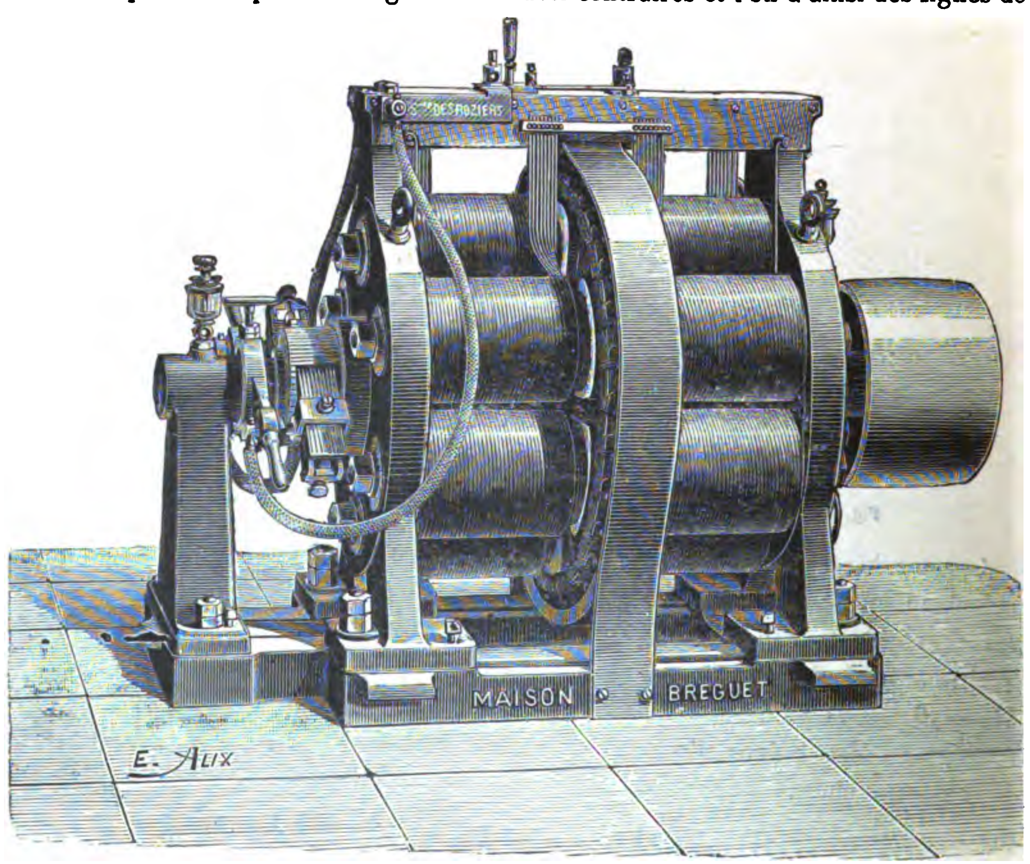


Fig. 393.

force dont le sens est variable d'un intervalle au suivant. C'est dans ce champ magnétique que se déplace l'induit discoïdal.

La figure 393 représente un modèle de dynamo à six doubles pôles, système Desroziers.

3° Inducteurs multipolaires pour induits en anneau plat. — Extérieurement la forme des inducteurs est la même que la précédente, mais il existe une différence importante dans le sens d'enroulement des bobines. En effet, un anneau plat est constitué par une série de boucles analogues à celle que représente la figure 394. Si cette spire tournait dans un champ NS, les courants produits dans les deux fils *ab* et *cd* seraient parallèles et de même sens : ils s'annuleraient par conséquent dans la spire. On doit donc régler le sens de l'électricité dans les bobines de façon à donner la même polarité à deux pôles en regard soit N

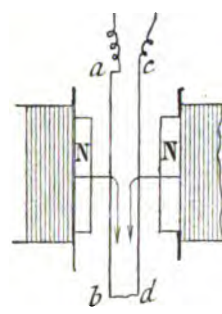


Fig. 394.

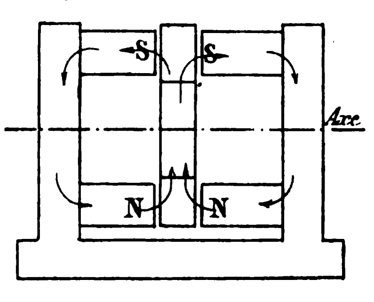


Fig. 395.

Fig. 396.

pour les deux (fig. 395). Il est visible alors que les courants engendrés dans *ab* et dans *cd*, pendant la rotation de l'induit, sont de sens contraire, et par suite s'ajoutent l'un à l'autre. On alternera donc encore tous les pôles d'une même couronne mais on mettra en regard ceux de même nom. Les circuits magnétiques se fermeront alors comme on le voit sur la figure, en empruntant une partie de l'armature plate annulaire et une partie des flasques.

Actuellement on fabrique peu de dynamos à anneau plat; la figure 396 montre un type construit il y a quelques années par M. *Fabius Henrion.*

4° **Inducteurs multipolaires à pôles internes.** — Tous les noyaux des électros sont montés radialement sur une pièce centrale qui est fixe. Le sens de l'électricité est encore inversé quand on passe d'une bobine à la suivante, de sorte qu'on obtient ainsi des pôles alternés.

L'induit mobile est porté par une armature annulaire extérieure aux pôles. On remarquera d'ailleurs qu'ici le flux de force émané des pôles pénètre dans l'induit par sa partie interne (fig. 397).

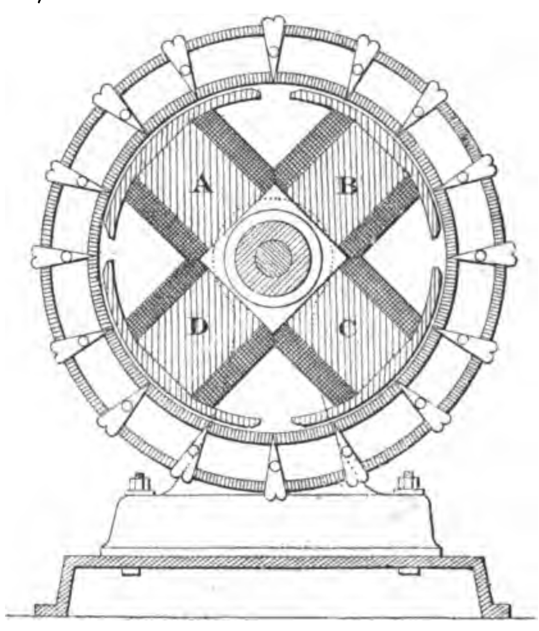


Fig. 397.

Nous verrons plus loin un modèle de dynamo de ce genre (machine de la Société alsacienne) quand nous parlerons du collecteur.

CHAPITRE IV

ÉTUDE DE L'INDUIT ET DU COLLECTEUR

Comme on le sait, il y a quatre modes principaux d'induit :

1° Anneau proprement dit ;

2° Tambour ;

3° Disque ;

4° Anneau plat.

Nous allons étudier rapidement chacun de ces modes en distinguant, pour les cas des anneaux et des tambours, les machines bipolaires des dynamos multipolaires.

Induit bipolaire à anneau. — C'est celui que nous avons toujours eu en vue jusqu'ici ; l'armature, comme nous le savons, a la forme d'une portion de tube, mais ce noyau n'est pas massif; il est formé ordinairement de feuilles de tôle de 1/2 millimètre isolées électriquement au vernis ou au papier gomme-laqué; quelquefois encore on constitue l'armature par du fil verni enroulé sur un mandrin spécial.

Sur cet anneau, recouvert d'un isolement, est enroulé le fil conducteur, en cuivre, isolé par un double guipage de coton et recouvert souvent, pendant le bobinage d'un vernis à la gomme-laque. Les entre-sections des diverses bobines sont reliées aux touches du collecteur et tout l'ensemble du fil forme un enroulement sans fin.

L'anneau ainsi terminé est solidement fretté de façon à éviter les déplacements des conducteurs, pendant le mouvement, sous l'influence de la force centrifuge.

La figure 398 représente un induit annulaire de la *Société Gramme*.



Fig. 398.

Nous pouvons remarquer que le flux variable qui passe à travers les spires est *coupé* uniquement par les portions du fil extérieures à l'armature ; chaque boucle de fil comprenant quatre parties, trois d'entre elles sont donc inutiles au point de vue de

l'induction ; elles ont l'inconvénient d'augmenter sans profit la résistance de l'induit. C'est là le gros défaut de l'anneau ; comme avantages on peut citer :

1° La simplicité du bobinage et la facilité des réparations, car chaque bobine est indépendante.

2° Il n'y a jamais une grande différence de potentiel entre deux conducteurs voisins, en raison même de ce système d'enroulement ; on n'a donc pas à craindre les communications électriques entre deux fils voisins à travers l'isolant.

Induit bipolaire à tambour. — On supprime la portion inutile de l'induit en anneau. Dans le but d'éviter les courants de Foucault, l'armature est divisée en tôles superposées et isolées traversées par l'arbre de rotation. Sur les faces terminales du cylindre, on peut placer des disques isolants munis de saillies destinées à séparer les diverses bobines.

Les fils sont dirigés suivant les génératrices du cylindre : deux conducteurs opposés f et f' (fig. 399) sont les sièges de forces électromotrices inverses et en effet il est facile, dans ce mode spécial d'enroulement de l'induit, de trouver le sens du courant par l'application de la loi de Faraday : l'observateur d'Ampère regardant dans la direction des lignes de force, soit de nord à sud, doit se déplacer vers sa droite. Pour cela dans le fil f, les pieds sont en avant de la figure et la tête en arrière : le courant va d'avant en arrière ; en f', c'est le contraire, l'électricité marche d'arrière en avant. Les deux courants produits sont donc concordants.

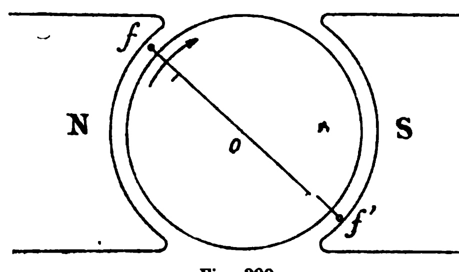


Fig. 399.

Il y a diverses manières d'enrouler les fils : l'une des plus employées consiste à mettre deux bobines dans chaque case ménagée sur le cylindre. La figure 400 indique

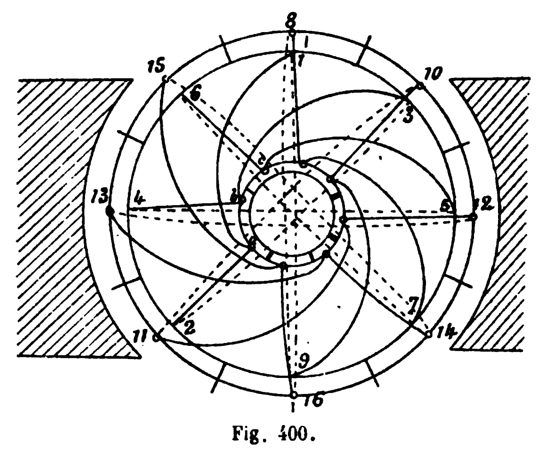


Fig. 400.

le dispositif. (Pour simplifier, on n'a supposé que huit compartiments et huit touches au collecteur). Les chiffres permettent de suivre aisément les fils ; les conducteurs

placés en arrière sont en pointillé. Partons de 1 et allons à la génératrice 2, à peu près opposée à 1, en prenant contact à l'une des lames a du collecteur. Après avoir parcouru la ligne 2, nous arrivons en arrière du cylindre, nous gagnons directement 3 et nous formons toute une bobine suivant 2-3 ; de là nous allons à la touche b, par le fil $3b$, puis en 4 pour former la seconde bobine 4-5, puis en c sur le collecteur et ainsi de suite. Après 7 on doit gagner la case qni contient déjà la bobine 1-9 ; une seconde couche devient nécessaire et on continue l'enroulement, de sorte que finalement chaque case loge deux bobines.

Quant aux fils de base du tambour, ils forment en se recouvrant les uns les autres, deux bourrelets presque hémisphériques aux extrémités du cylindre.

Le tambour terminé, on doit, pour éviter les effets de la force centrifuge et, en raison de la longueur des fils, établir des frettes très solides.

On a figuré schématiquement (fig. 401) le bobinage d'un tambour pour montrer le mode d'induction : la surface latérale est développée et les fils qui la recouvrent sont représentés par des traits verticaux (ces traits sont doublés ; ils correspondent aux deux bobines logées dans le même espace).

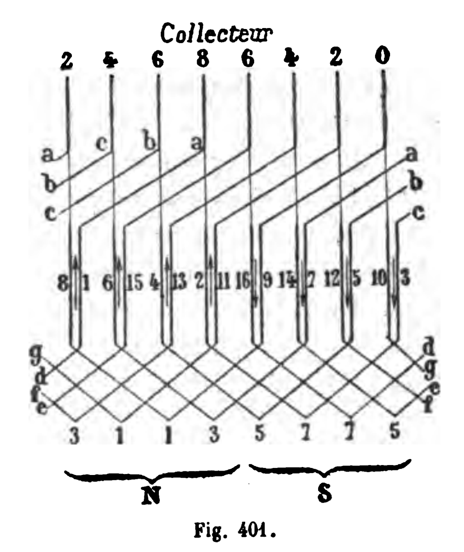


Fig. 401.

Il est facile de constater l'identité des enroulements représentés par les figures 400 et 401 : que l'on suive pour cela bien attentivement le fil d'abord sur la figure 400 à partir du point 1, puis ensuite sur la figure 401 en partant du même point : on retrouvera dans le même ordre les divers fils de l'enroulement.

On a marqué N et S les deux régions soumises respectivement à l'action du pôle Nord et du pôle Sud ; dans ces deux parties du champ magnétique, les courants induits sont contraires : on les a figurés par des flèches verticales. Remarquons encore que, dans le développement du cylindre sur le plan de figure, les fils de connexion ont été coupés en des points marqués a, b, c, d, e, f, g.

Pour nous rendre compte, d'une manière simple, de la génération du courant, imaginons que la f. é. m. induite dans chaque fil soit la même ; prenons-la pour unité et cherchons d'après cela quelle est la valeur du potentiel sur les diverses lames du collecteur ; nous partirons de la touche marquée o et nous supposerons que cette lame est au potentiel zéro ; parcourons d'abord le fil 10 : la f. é. m. induite étant l'unité, nous aurons le potentiel 1 sur la connexion de 10 à 11 ; le fil 11 nous donne une nouvelle tension unité d'où la valeur 2 du potentiel sur la deuxième lame et ainsi de suite.

Le potentiel sera donc alors, sur les huit touches du collecteur :

0, 2, 4, 6, 8, 6, 4, 2

Pour recueillir le courant, nous poserons nos balais sur les lames 0 et 8 qui présentent l'une sur l'autre une différence de niveau maxima : les balais seront donc à peu près suivant la ligne neutre. Mais, dans certains cas, et dans le but de diminuer la longueur des fils de raccordement, on est amené à faire tourner le collecteur de 90° autour de son axe ; alors il faut mettre les balais suivant la ligne des pôles.

L'enroulement en tambour présente l'avantage de n'avoir, comme parties inutiles de fil induit, que celles qui recouvrent les abouts du cylindre ; on peut donc réduire leur importance relative en augmentant la longueur du tambour : la résistance du fil et aussi les dimensions de l'armature, capables d'un effet donné, peuvent ainsi être réduites,

Il a, d'autre part, quelques inconvénients :

1° La construction est plus compliquée que celle d'un anneau ; l'ensemble est plus sujet aux déformations des fils, à cause de la force centrifuge et de la grande longueur des conducteurs disposés suivant les génératrices.

2° Les réparations sont aussi plus difficiles à effectuer que celles des anneaux, car l'on doit souvent dérouler l'induit presque en entier pour atteindre la section détériorée.

3° Les fils se croisent suivant les bases du tambour, et entre eux peuvent exister de grandes différences de potentiel. Cela nécessite un isolement très soigné et empêche l'emploi des induits à tambour quand on veut obtenir des forces électromotrices élevées. Malgré cela la disposition en tambour est beaucoup plus employée maintenant que la forme annulaire.

Induits multipolaires en général. — Considérons une spire (appartenant à un anneau) ou un fil rectiligne (faisant partie d'un tambour) se déplaçant d'un tour complet dans le champ d'une dynamo bipolaire. Ce conducteur est le siège d'un courant alternatif qui passe exactement par toutes les phases d'une période complète.

Il en résulte qu'*à un moment donné*, le courant né dans les conducteurs de toute une moitié de l'induit a un sens semblable mais contraire de celui qui se produit dans toute la seconde moitié. On sait que le collecteur a pour mission de grouper convenablement ces deux courants opposés.

Mais soit maintenant une machine multipolaire, à $2p$ pôles : à un tour de l'induit correspondent p périodes entières ; donc, à un moment donné, il y a p parties traversées par des courants concordants d'un certain sens et p parties traversées aussi par des courants concordants entre eux et contraires des premiers.

On peut disposer de diverses manières de ces p courants de chaque sens. Les deux façons les plus employées consistent à les grouper :

1° *En quantité* ou *en parallèle* ;

2° *En série* ou *en tension.*

Nous allons donc avoir à examiner séparément les induits multipolaires à anneau et à tambour groupés en quantité et en tension.

Induits multipolaires à anneau en parallèle. — L'enroulement de l'induit n'est pas modifié mais si les pôles sont au nombre de quatre (fig. 402), il existe deux

lignes neutres $p\,q$ et $p'\,q'$ qui partagent l'anneau en quatre parties égales.

La spire qui passe sur ces lignes reçoit un flux maximum, et, au contraire, en 1, 2, 3 et 4, devant les pôles, le flux est nul. Le courant atteint en ce dernier endroit sa va-

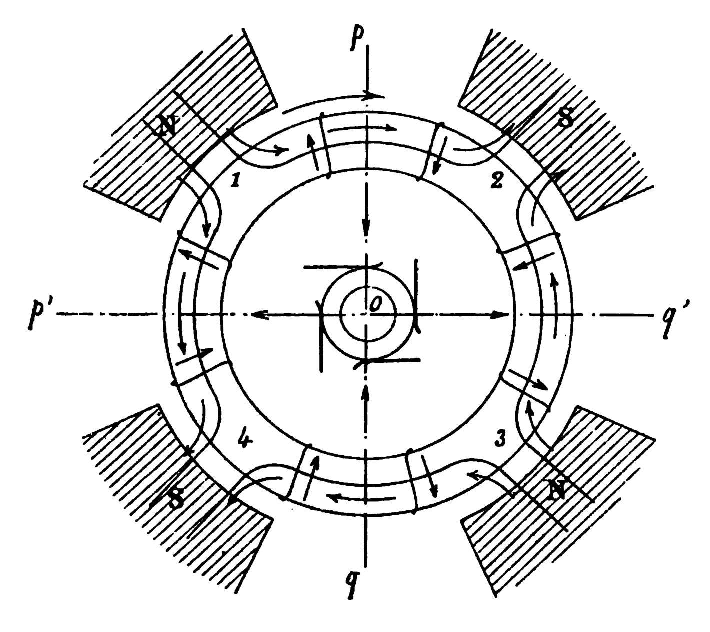


Fig. 402.

leur maxima et s'annule aux lignes neutres. Il y a donc, dans le fil continu qui entoure l'armature, quatre forces électromotrices résultantes et de sens alternés : l'une correspondant à la partie pq', la deuxième à $q'q$, la troisième à qp' et enfin la dernière à $p'p$.

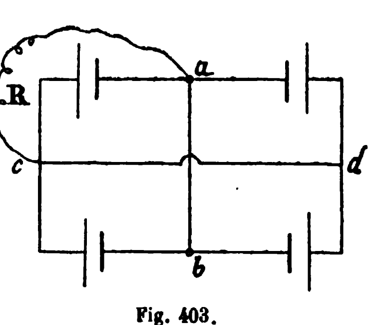


Fig. 403.

Représentons (fig. 403) ces quatre f. é. m., telles qu'elles se présentent dans la machine tétrapolaire. L'effet total est nul, en raison du groupement même, mais nous pouvons réunir a et b d'une part, et c et d de l'autre. Nous formons entre a et c un circuit R dans lequel les quatre sources envoient de l'électricité ; tous les courants sont ainsi groupés *en quantité*.

Pratiquement on réalise ces attaches de deux manières :

1° Au moyen de *balais en nombre égal à celui des pôles*. Dans la machine tétrapolaire figurée, les balais opposés l'un à l'autre sont réunis entre eux et on fait la prise de courant entre les deux fils de réunion.

C'est le mode le plus souvent utilisé. La figure 404 en montre un exemple; elle représente une machine à huit pôles de la Compagnie générale électrique de Nancy,

avec un nombre égal de lignes de balais. Ces balais sont réunis entre eux de deux en deux par deux anneaux métalliques sur lesquels se fait la prise de courant.

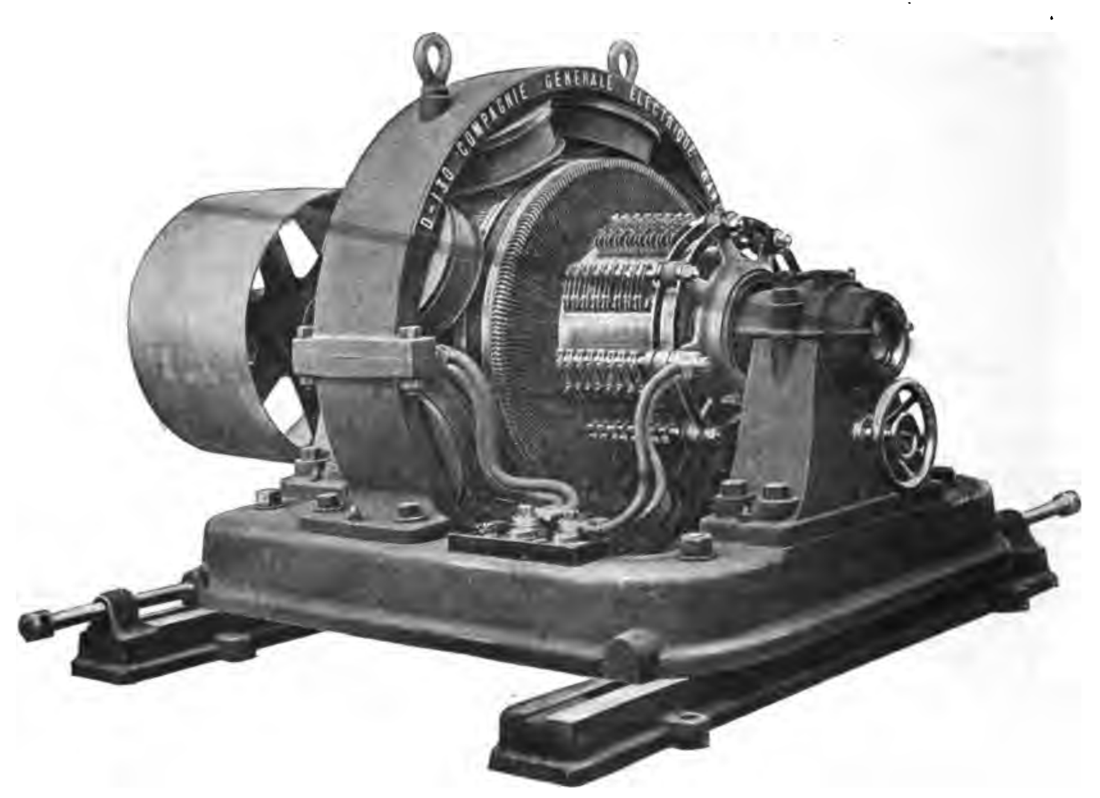


Fig. 404.

2° Quelquefois on supprime ces balais supplémentaires; soit, par exemple, une dynamo tétrapolaire. On relie par des fils conducteurs, deux entre-sections opposées et de cette manière., se trouve réalisée la mise en parallèle de deux sections, sièges de f. é. m. égales. On voit (fig. 405) ces connexions qui exigent bien entendu un nombre pair de bobines. Dans ce cas, deux balais distants, de 90° suffisent pour recueillir le courant, mais ce résultat est atteint grâce à une complication de l'enroulement et les courts-circuits deviennent à craindre entre les fils qui se croisent.

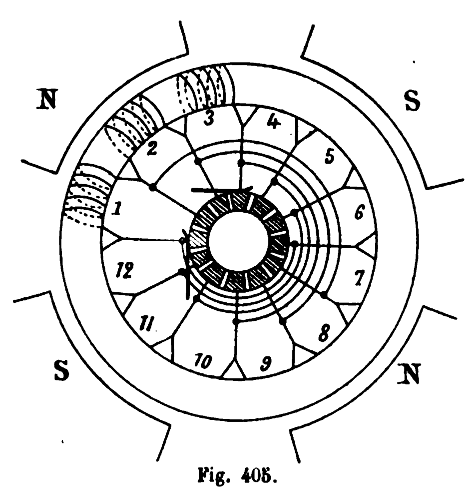


Fig. 405.

Cette réduction à deux du nombre des balais dans les dynamos multipolaires n'offre d'ailleurs de l'intérêt que dans le cas de machines de faible puissance. Dans les fortes

dynamos, le grand nombre de balais assure la division du courant et par suite préserve le collecteur.

Les dynamos multipolaires à anneau en quantité présentent cette obligation d'une égalité parfaite des f. é. m. induites dans les portions reliées; s'il n'en est pas ainsi, l'un des groupes de spires envoie un courant dans un autre produisant une tension moindre. Ce courant se traduit par la production d'étincelles et par un échauffement anormal du collecteur. Pour annuler ce défaut, divers moyens ont été employés :

Dans la dynamo *Schneider,* les lamelles de jonction au collecteur réunissent les lames qui doivent être, de par leur situation, vis-à-vis des pôles, aux mêmes potentiels.

Dans les machines *Westinghouse*, l'équilibrage s'obtient par la réunion de quelques points de l'induit, normalement aux mêmes potentiels.

Induits multipolaires à anneau en tension. — Nous n'indiquerons qu'une seule disposition relative encore à une machine tétrapolaire ; il s'agit donc de mettre en tension la moitié des spires concordantes de l'anneau, d'une part, et de relier de même, d'autre part, les spires de la seconde moitié de façon à avoir un total général égal à zéro.

Divisons (fig. 406) l'anneau en 14 parties égales et garnissons chacune d'elles d'une

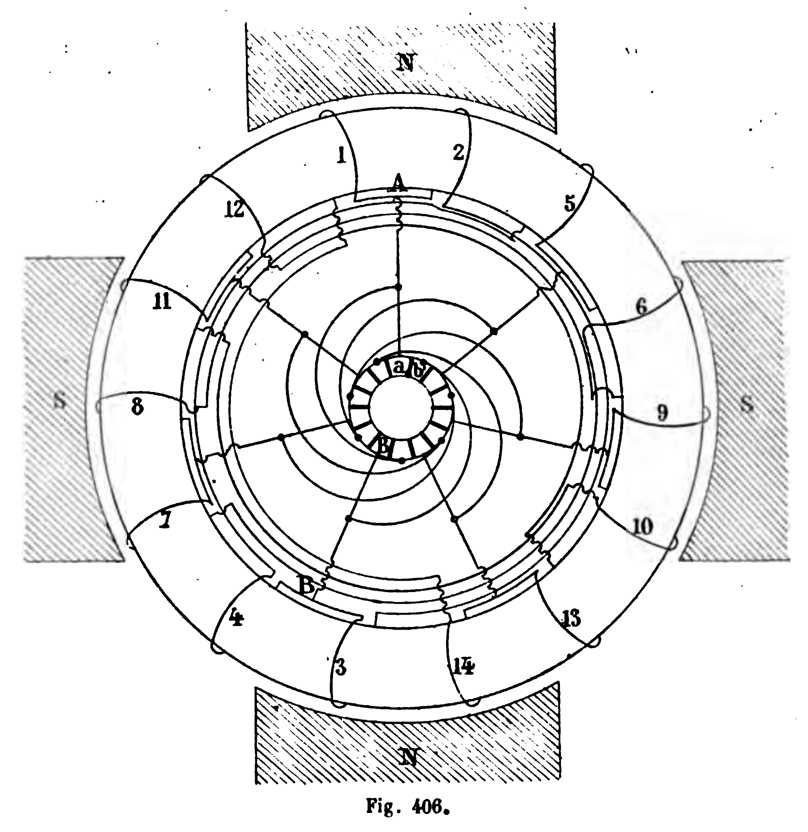


Fig. 406.

bobine semblable. Relions les deux bobines 1 et 2 au point A et passons à 3 opposée à 2 puis à 4 qui fait suite à 3 sur l'anneau. On continue ensuite à connecter toutes les

bobines dans l'ordre de leurs numéros jusqu'à fermer l'enroulement sur lui-même par le conducteur 14-1. Remarquons que deux bobines opposées, 2 et 3 par exemple, sont exactement soumises aux mêmes actions concordantes ; elles se comportent ensemble comme un enroulement unique, siège d'une f. é. m. double de celle qui naît dans un seul segment. Il en résulte que nous avons en résumé sept bobines doubles :

1-14, 2-3, 4-5, 6-7, 8-9, 10-11, 12-13

qui peuvent être représentées, quant au sens de la f. é. m., par les enroulements unitaires :

1, 2, 5, 6, 9, 10, 13

Ces sept bobines occupent la moitié du champ magnétique, c'est-à-dire l'intervalle de deux pôles, de sorte que l'ensemble se comporte comme une dynamo bipolaire de sept bobines doubles, soit de quatorze bobines simples. Il reste maintenant à traiter la question du collecteur : chaque groupe de deux enroulements, 2-3 par exemple, est séparé des voisins par des points A et B que l'on fait communiquer avec deux lames du collecteur ; ces deux touches doivent être contiguës, mais pratiquement, et pour la symétrie des connexions, on donne au collecteur autant de sections qu'il y a de bobines, soit quatorze dans le modèle représenté. Chaque entre-section, telle que A et B, communique à la touche en regard *a* et *b* et l'on établit une connexion permanente entre deux touches opposées *b* et *b'*. De cette façon les entre-sections qui se suivent dans l'enroulement sont reliées à des lames voisines du collecteur et la disposition Gramme est conservée.

Quant aux balais, ils sont placés à 90° l'un de l'autre et suivant deux lignes neutres, puisque la génération du courant peut être considérée comme due à deux pôles rectangulaires.

Machines multipolaires à tambour en parallèle. — Il y a plusieurs manières de disposer les fils. Considérons l'une d'elles pour le cas particulier d'une dynamo tétrapolaire (fig. 407); divisons la périphérie du tambour en 24 parties égales et disposons douze bobines de largeur plus grande que celle d'un pôle; ces bobines, 1-1 par exemple, couvrent cinq divisions de la circonférence puis nous retournons en arrière de trois divisions et nous formons la seconde bobine 2-2. Continuons de même à disposer nos bobines et nous arrivons à couvrir la surface totale de l'armature, d'une façon symétrique. Relions ensuite les bobines consécutives par des fils 1-2, 2-3, etc. ; nous avons un enroulement fermé sur lui-même que l'on

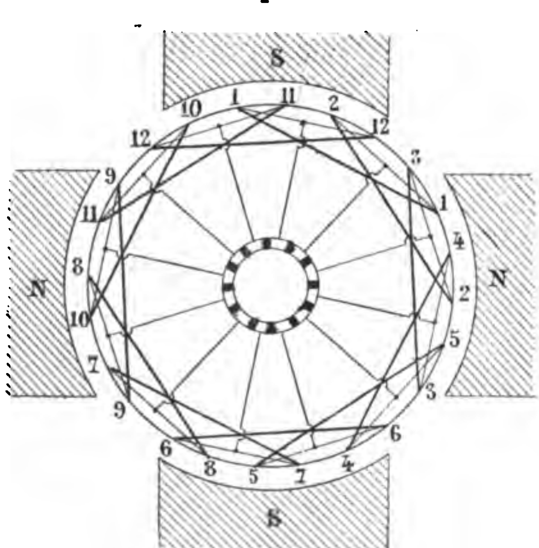


Fig. 407.

appelle *induit imbriqué*; chaque entre-section enfin est reliée, comme on le voit, à l'une des lames du collecteur.

Cet induit présente l'avantage pratique de pouvoir être constitué par des bobines faites à l'avance et mises ensuite en place sur le tambour.

Cherchons maintenant à nous rendre compte de la génération du courant :

Pour cela employons la représentation schématique déjà utilisée dans le cas d'un induit bipolaire à tambour; nous obtenons le tracé (fig. 408).

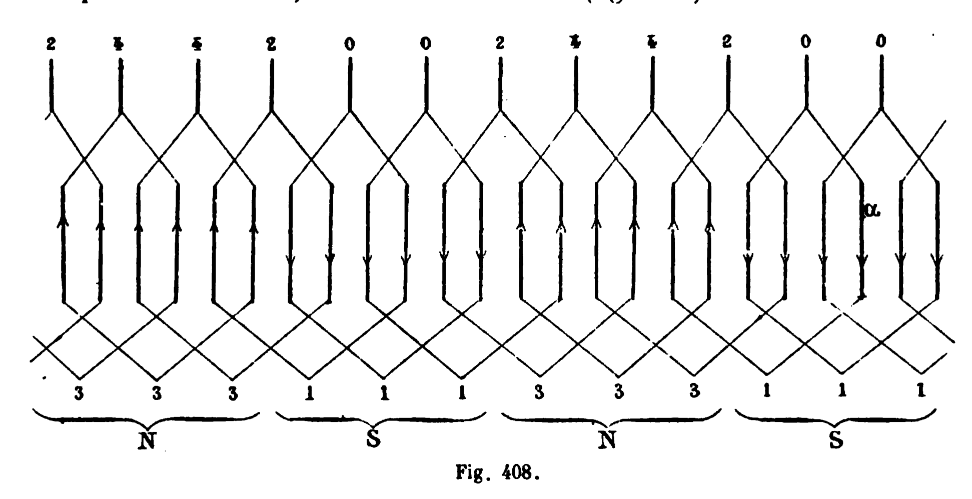


Fig. 408.

On remarque, ici comme dans la figure 407, que chaque boucle comprend cinq divisions de la circonférence du cylindre, puis la seconde recouvre la première de trois divisions et ainsi de suite. Marquons les régions polaires N, S, N et S et les sens des courants induits dans ces diverses parties.

Partons d'une touche du collecteur, soit 0, et supposons-la au potentiel zéro, en admettant encore que la f. é. m. produite dans chaque fil soit d'une unité. Nous avons, en parcourant le conducteur entier (α au début), sur les différentes touches du collecteur, les valeurs marquées pour le potentiel :

2, 4, 4, 2, 0, 0, 2, 4, 4, 2, 0, 0

On trouve successivement :

Un maximum ;

Un minimum ;

Un second maximum égal au premier ;

Un second minimum égal au premier.

Il faut donc, pour recueillir le courant, quatre balais qui sont alternativement positifs et négatifs ; ces balais sont reliés de deux en deux : ainsi se trouve réalisé le groupement en parallèle de la même façon que pour les anneaux ; la disposition extérieure est donc la même.

Machines multipolaires à tambour en série. — Soit toujours comme exemple une dynamo tétrapolaire ; un mode d'enroulement assez employé est celui que

représente la figure 409 ; divisons le tambour en 38 parties égales et formons une première boucle suivant 1-10, puis, par le fil postérieur 10-19, gagnons la généra-

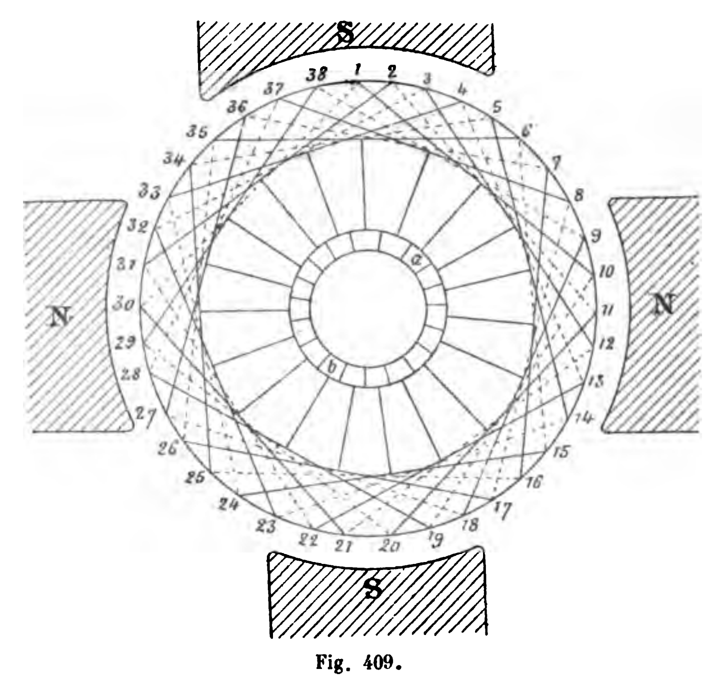


Fig. 409.

trice 19 et faisons une seconde boucle 19-28 et ainsi de suite. Nous arrivons finalement à fermer le fil sur lui-même au moyen du conducteur postérieur 30-1. Les diverses connexions antérieures, telles que 1-10, 19-28, etc., sont unies aux lames *a*, *b*, etc., du collecteur.

Nous étudierons encore le mode de production des courants par le procédé déjà

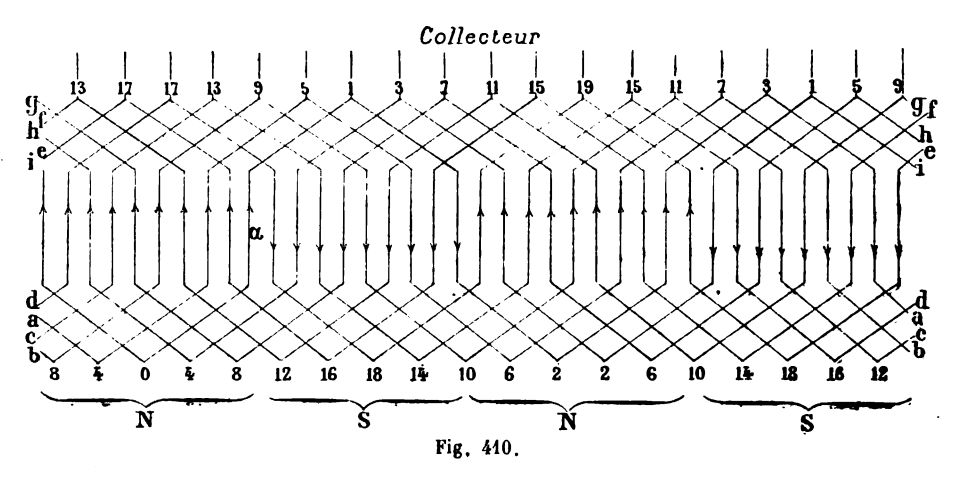


Fig. 410.

employé : soit (fig. 410) le développement de l'induit qui est, comme on le remarque, *ondulé,* chaque boucle couvrant neuf divisions de la circonférence.

Pour étudier la valeur du potentiel sur le collecteur, partons d'un point O, postérieur et parcourons tout le fil. Prenons encore pour tension zéro celle du point O et admettons une f. é. m. unité dans chaque fil : les potentiels atteints à la suite de chaque conducteur, en commençant par α, sont marqués sur la figure tant du côté collecteur que du côté opposé. Suivons cette tension d'un bout à l'autre du fil ; nous trouvons les chiffres successifs :

0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 18, 17, 16, 15, 14, 13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0.

Sur le collecteur nous trouvons, en suivant l'ordre des lames :

1, 3, 7, 11, 15, 19, 15, 11, 7, 3, 1, 5, 9, 13, 17, 17, 13, 9, 5.

On voit donc que, pour recueillir le courant, sous son plus grand voltage, nous avons à prendre contact aux points correspondants aux chiffres 1 et 19 ; il faut donc deux balais seulement disposés à 90° et sensiblement dans les milieux des espaces polaires.

On peut remarquer que le nombre des conducteurs disposés suivant les génératrices du tambour n'est pas quelconque, car il faut d'abord fermer le fil sur lui-même par un enroulement symétrique et ensuite obtenir, ici comme dans tout autre enroulement (anneau Gramme par exemple), deux courants s'annulant complètement dans ce circuit sans fin : cette seconde condition exige qu'après avoir enroulé la moitié des conducteurs, 19 dans l'exemple choisi (fig. 409) on ait à mettre le suivant (n° 20) exacte-

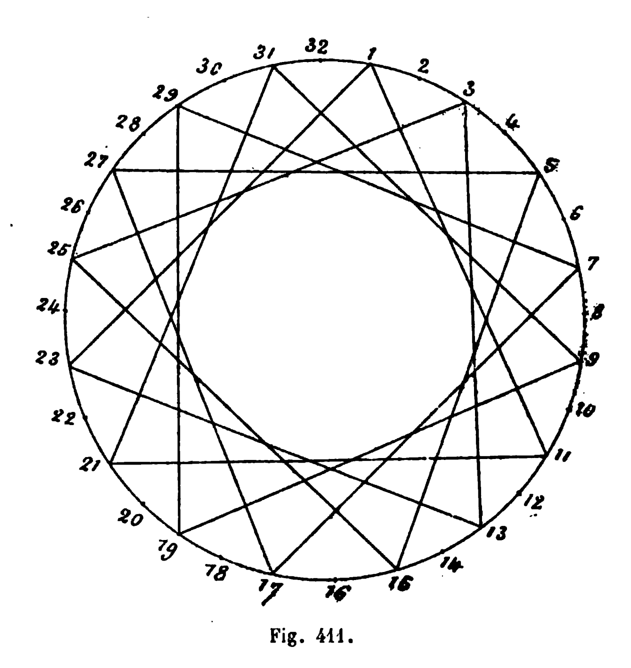


Fig. 411.

ment dans la même situation que le premier (n° 1) par rapport à un pôle (avec cette différence que les pôles voisins des deux fils soient naturellement inverses, l'un Nord,

l'autre Sud). Ainsi dans le cas particulier d'une machine tétrapolaire, le calcul indique pour les nombres de conducteurs possibles :

6, 10, 14, 18, 22, 26, 30, 34, 38

ou, bien entendu, des multiples de ces nombres.

Induit à disque. — Il consiste en conducteurs posés à plat sur une pièce non magnétique et tournant entre les pôles d'électro-aimants constituant un champ normal au disque.

Prenons comme type l'induit Desroziers pour une machine à six pôles doubles (voir page 374).

Considérons la circonférence partagée en 32 parties égales et joignons 1 et 11, 11 et 21, etc.; il est facile de voir que nous fermerons le tracé sur lui-même par la droite 23-1 ; il y a ainsi 16 lignes ; chacune représente un segment de l'enroulement Desroziers (fig. 411).

Soit le segment 1-11 ; il est constitué (fig. 412) par quatre parties :

1° Une partie courbe, en forme de développante de cercle, de 1 en a (division 6) ;

2° Un rayon ab devant la division 6 ;

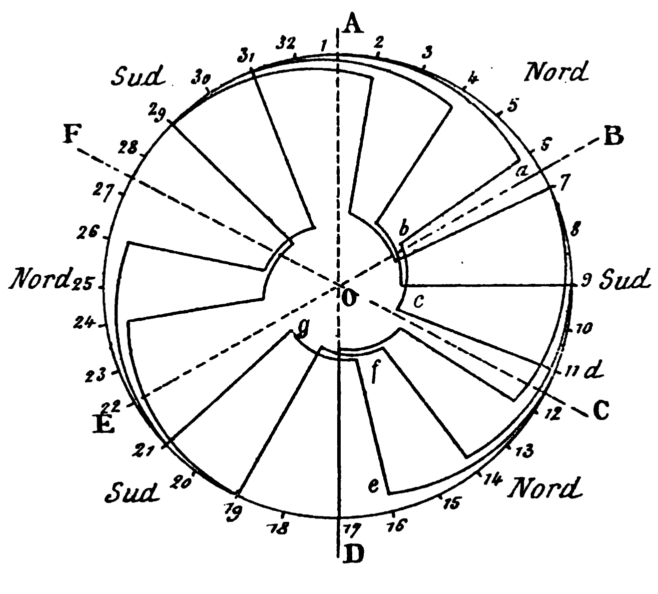


Fig. 412.

3° Seconde développante bc entre le rayon 6 et 11 ;

4° Rayon cd devant 11.

Représentons les lignes neutres en OA, OB, OC, OD, OE et OF.

Les seules parties actives au point de vue de l'induction sont les portions radiales telles que ab et cd. La première est très voisine de la ligne neutre OB et un peu en

retard sur elle ; le second rayon retarde sur OC ; il en résulte que les deux courants induits dans ce premier segment sont concordants ; il en est de même pour *ef* et *gh* du second segment : leurs courants s'ajoutent à ceux de la première partie et l'on trouve la même concordance pour toutes les f. é. m. produites dans les huit premiers segments, soit dans les seize fils radiaux qui constituent la première moitié de l'enroulement.

Ces fils sont seuls représentés dans la figure 412 ; le dernier est suivant OD; mais il reste encore seize fils radiaux à placer et l'on voit aisément qu'ils sont les sièges de f. é. m. inverses des précédentes puisque le point de départ D occupe dans le champ magnétique une situation absolument contraire de celle du point A.

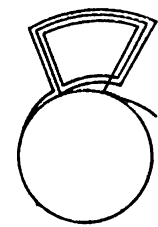
Il en résulte que les deux courants totaux sont égaux et doivent, comme dans la machine Gramme, se neutraliser mutuellement. On peut les grouper au moyen d'un collecteur.

Pratiquement, les fils sont disposés sur deux disques de carton et on les partage en deux parties ; considérons un segment de fil tel que *bcdefg*. On prend seize formes semblables séparées. Il suffirait, comme on le voit aisément, de les mettre bout à bout pour constituer tout l'enroulement. Mais on en met huit sur un disque, huit sur l'autre, en alternant.

Les plateaux sont perforés de manière qu'on puisse, à chaque angle, faire traverser le carton par le fil. Dès lors le conducteur forme une sorte de couture sur le disque : on a d'un côté les parties radiales, de l'autre les portions courbes et il n'y a de la sorte aucun croisement de fil.

Chaque fil de liaison d'une section à la suivante est relié au collecteur ; il y a seize points semblables dans le système indiqué, mais seize touches ne suffisent pas, car trois fois par tour, un point, *a* par exemple, revient dans la même situation par rapport aux inducteurs (à six pôles). Il faut donc qu'après un tiers de révolution, le même balai, qui touchait *a* au début, soit encore en communication électrique avec ce point. On y arrive en formant le collecteur de 96 lames qui communiquent entre elles trois par trois à 120°. Les communications sont établies au moyen d'un *connecteur*, pièce isolante montée sur l'arbre et permettant d'éviter les croisements de fils.

Il y a deux balais placés à 60° l'un de l'autre, ou, ce qui revient au même, à 180°. Pratiquement, au lieu d'un fil unique, on emploie une sorte de bobine plate dont la disposition est indiquée sur la figure 413.


Fig. 413.

L'absence de fer dans l'induit à disque supprime les pertes d'énergie par hystérésis et par courants de Foucault.

D'un autre côté, on se trouve obligé d'augmenter l'entrefer, pour donner du jeu au disque, et le grand nombre de pôles nécessaires augmente aussi la dépense d'excitation.

Quant à l'utilisation du fil, on voit qu'elle laisse un peu à désirer ; les parties inactives réunissant les fils radiaux sont très importantes et on ne peut éviter cet inconvénient.

Induit denté. — Au lieu de disposer le fil induit à la surface de l'armature, anneau ou tambour, on peut le loger à l'intérieur du métal magnétique; une première solution de ce problème consiste à faire usage d'induits dentés. Les tôles convenablement découpées sont assemblées de façon à présenter leurs dentures d'une manière concordante et on enroule les sections induites dans les intervalles.

Cette disposition présente plusieurs avantages :

1° Protection complète du fil et solidité du bobinage;

2° Réduction de l'entrefer, d'où économie d'excitation.

Par contre, il y a un inconvénient consistant en des variations périodiques du champ dues à ce fait que les lignes de force atteignent l'armature surtout par ses dents. Ces lignes se coupent continuellement pour se rétablir dans des dents suivantes : il en résulte des courants de Foucault et de l'hystérésis. Le phénomène est accusé par la production d'un son.

Pour éviter cet inconvénient, il convient de porter à son maximum l'induction magnétique dans les dents de l'armature; une partie du flux est bien obligée alors de passer dans les intervalles.

Cette disposition des induits est celle que l'on adopte le plus généralement : on fait usage, dans la plupart des grosses machines, de *tambours dentés* : l'armature est formée par l'assemblage d'anneaux ou de portions d'anneaux isolés, maintenus par des plateaux de serrage et montés sur l'arbre au moyen d'un croisillon ou par toute autre méthode. Dans ces machines, les conducteurs induits sont des barres de cuivre étiré mises en forme sur des mandrins, puis logées et isolées dans les fentes du tambour. Un tel ensemble, en raison de la rigidité des conducteurs et de leur encastrement, est d'une solidité remarquable. Certains tambours semblables ne sont pas même frettés. Généralement on assure la ventilation des enroulements en ménageant entre les tôles quelques plaques-évents. Quand la machine tourne, l'air froid aspiré suivant l'axe est rejeté à la périphérie.

Induit Brown. — La disposition Brown conduit au même résultat que la précédente : elle consiste à pratiquer dans les tôles de l'armature des trous se correspondant dans le montage de façon à former des tubes parallèles aux génératrices; les fils sont alors passés dans ces canaux au lieu d'être posés à la périphérie du noyau et l'on obtient ainsi des induits lisses d'une grande solidité avec lesquels on peut réduire à une valeur minime la longueur de l'entrefer. Mais on remarque, comme inconvénients du système :

1° La difficulté de l'enroulement;

2° L'augmentation de la self-induction du circuit, chaque fil étant complétement noyé dans le métal magnétique, d'où une production d'étincelles aux balais.

Pour diminuer ces inconvénients, on fend le métal magnétique devant chaque canal et de cette façon :

1° Les fils sont facilement passés dans leur logement; leur immobilité est assurée ensuite au moyen de cales;

2° La self-induction diminue aussi par la suppression de cette gaine magnétique complète.

Collecteur. — Nous connaissons son rôle; cette partie importante est ordinairement formée de lames, en cuivre dur étiré, montées sur un manchon qui tourne avec l'arbre; ces pièces sont isolées entre elles et du manchon au moyen de mica, seule matière restant suffisamment résistante à la chaleur et à l'humidité.

La figure 414 montre une disposition particulière des lames du collecteur.

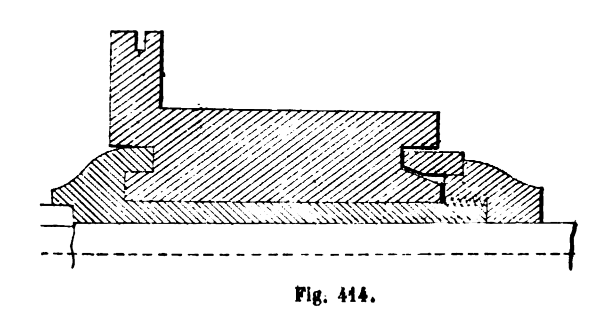


Fig. 414.

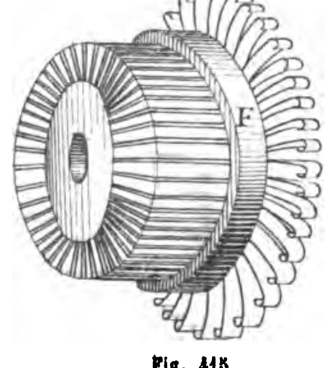


Fig. 415.

Dans certains cas on frette solidement l'ensemble par une ou deux bagues bien isolées telles que F (fig. 415). Chaque lame présente généralement un appendice destiné à établir sa communication avec l'entre-section voulue. Quant au mode de réunion, il est variable, mais ordinairement c'est par soudure que l'on opère.

La dimension des lames du collecteur est variable avec l'intensité du courant que la machine doit débiter; il s'agit en effet d'éviter l'échauffement trop considérable des lames.

Quant au nombre de touches, il est intimement lié au voltage compté entre les bornes.

Dans certains cas, lorsqu'on désire un fort débit sous une tension faible (en électro-

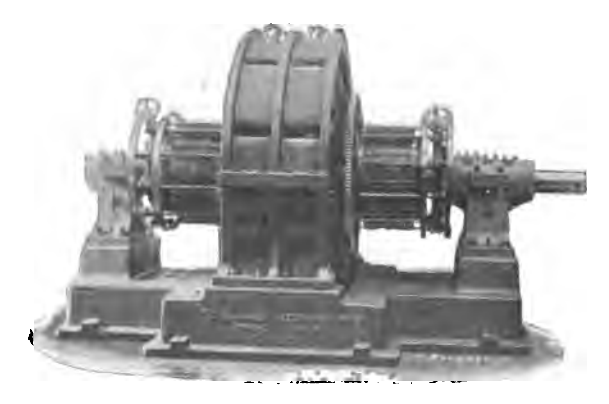


Fig. 416.

métallurgie) on peut être amené à remplacer le collecteur unique par deux collecteurs. Cela est réalisé dans les dynamos *Labour* spéciales pour électrolyse (fig. 416).

L'enroulement en anneau est double et les deux bobinages sont enchevêtrés ; à chacun d'eux correspond un collecteur.

Quant à la position du collecteur, lorsqu'il est unique, d'un côté ou de l'autre de l'induit, elle n'a pas généralement d'importance spéciale. Cependant dans le cas de dynamos entrainées directement par les turbines à axe vertical, on s'arrange de manière à rendre ce collecteur facilement accessible : la figure 417 représente une machine

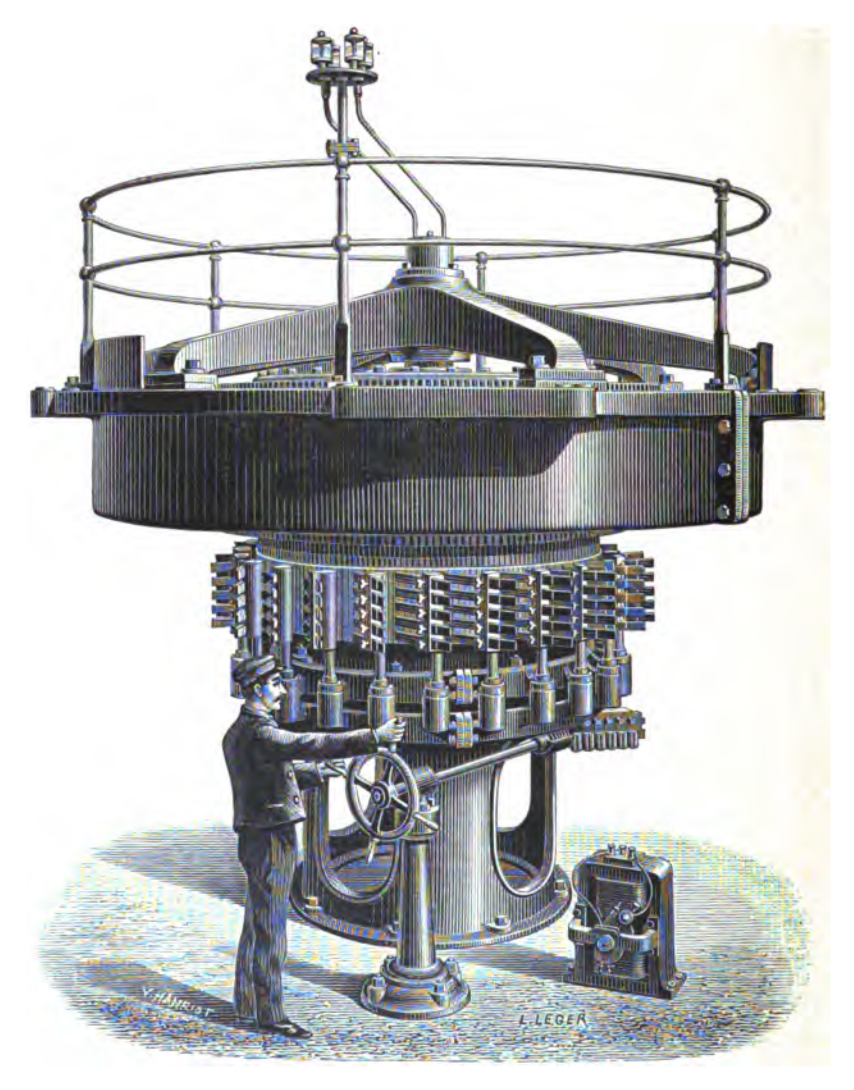


Fig. 417.

d'Œrlikon donnant 7.500 ampères sous 55 volts. La partie fixe est l'inducteur auquel se rattache par un croisillon, comme on le voit, le palier supérieur de la machine. Le collecteur, à hauteur d'homme, est ici au-dessous de l'induit.

Sur le collecteur appuient les balais. Au début on faisait exclusivement usage de frotteurs métalliques. On a employé des paquets de lames ou de fils de cuivre, puis des balais en toile de cuivre enroulée sur elle-même et fortement serrée. Les meilleurs balais métalliques sont ceux que l'on obtient au moyen d'un alliage à base de cuivre laminé aussi fin que possible et mis à la dimension voulue par un plissage et une pression énergique.

Actuellement on se sert presque toujours de frotteurs en charbon et l'on trouve à cet emploi des avantages assez nombreux : le collecteur ne s'use pas car si des étincelles jaillissent, elles provoquent la combustion des parcelles de charbon au lieu de détériorer le métal ; leur frottement est doux et ils ne donnent même aucune poussière capable d'encrasser le collecteur. On ne conserve les balais métalliques que dans les dynamos à fort débit, pour l'électrolyse.

Quant aux dimensions des balais, elles sont variables avec le débit que la machine doit fournir. Le plus généralement, comme on le voit sur les figures données précédemment, on ne met pas de balais uniques mais des lignes de balais prenant tous à la fois contact sur une même touche du collecteur. L'intensité se partage alors entre ces divers conducteurs.

Les balais ou les lignes de balais sont fixés à une pièce qui s'appelle *porte-balais* et qui a pour but :

1° De déplacer ensemble tous les frotteurs à volonté ;

2° De faire varier la pression des balais sur le collecteur.

Dans le cas de machines bipolaires (voir fig. 368) le porte-balais peut être constitué

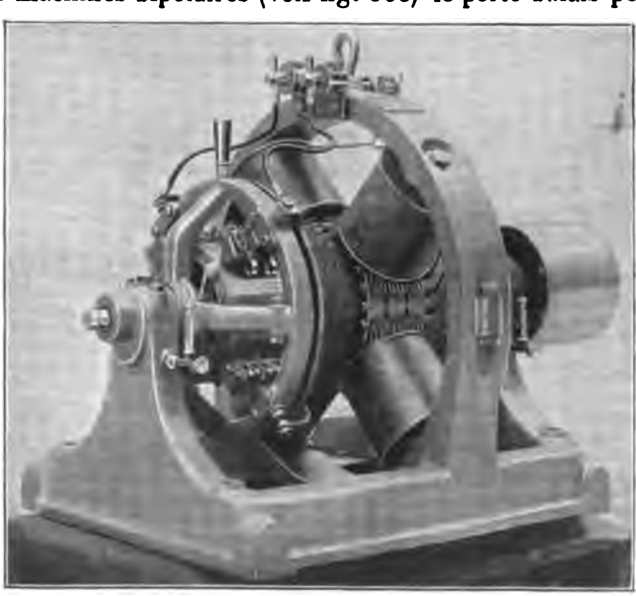


Fig. 418.

simplement par un collier mobile autour d'un axe (correspondant à celui de la machine) relié à un palier généralement. Ce collier porte deux bras radiaux sur lesquels sont

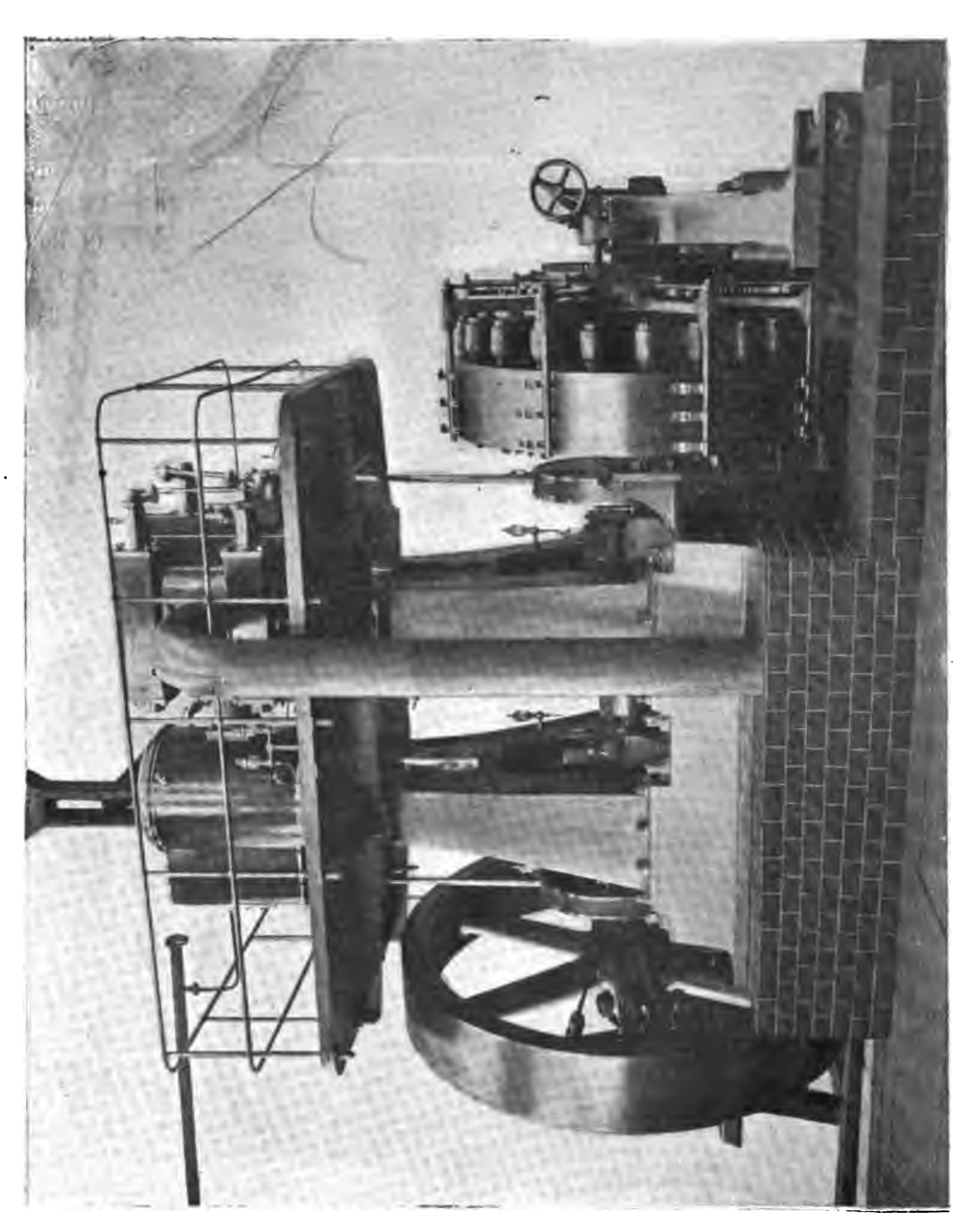


Fig. 419.

fixés les deux axes des balais. Le système se déplace en bloc et permet ainsi le calage; d'autre part chaque balai isolément est maintenu contre le collecteur par un ressort dont on règle à volonté la tension.

Cette question de pression est importante; en effet si sa valeur est trop forte, il ya un échauffement anormal; si on la diminue trop, le contact devient insuffisant.

Dans les dynamos multipolaires, les porte-balais sont un peu plus compliqués. La figure 418 nous fait voir une dynamo *Ganz et Cie*, type E, dans laquelle le porte-balais est un anneau fixé sur le palier et recevant à sa partie interne les balais en charbon. Ces frotteurs sont réunis de deux en deux par des conducteurs de manière à constituer les pôles de la machine.

Remarquons, en passant, sur ce dessin, la légèreté de la carcasse d'acier et la division des pièces polaires dans le but d'affaiblir la réaction de l'induit (voir plus loin).

Dans la machine *Westinghouse*, le porte-balais est supporté par des bras faisant saillie sur un anneau concentrique à la carcasse magnétique et monté sur cette carcasse. Le décalage s'obtient par la manœuvre d'un petit volant à main.

La disposition de ce porte-balais a pour avantage de dégager complètement le collecteur et les balais.

Dans quelques cas spéciaux on supprime le collecteur et la prise de courant se fait directement sur les conducteurs induits eux-mêmes.

Indiquons, à titre d'exemple, les dynamos de la *Société Alsacienne*, type I (fig. 419); l'induit, extérieur au système inducteur, est formé de barres de cuivre nu, les unes en forme d'U, les autres rectilignes placées dans des gouttières isolantes et réunies entre elles par une soudure de façon à constituer un enroulement continu. Les secteurs extérieurs à cet induit ont une hauteur considérable pour prévenir l'usure résultant du frottement des balais qui appuient directement sur ce pourtour.

CHAPITRE V

ÉTUDE GÉNÉRALE COMPLÉMENTAIRE DE LA DYNAMO

Nous examinerons dans ce chapitre diverses questions et notamment le *voltage*, la *puissance*, le *rendement* et le *calage des balais*.

Force électromotrice d'une dynamo bipolaire. — Faisons pour le moment abstraction des complications résultant du déplacement de l'âme de fer doux, et supposons le flux réparti symétriquement dans les deux moitiés supérieure et inférieure de l'anneau. Soit une spire en mouvement. Appelons $\mathfrak{N}$ le flux de force qui traverse le circuit magnétique fermé de la machine. Chaque moitié de l'armature reçoit la portion

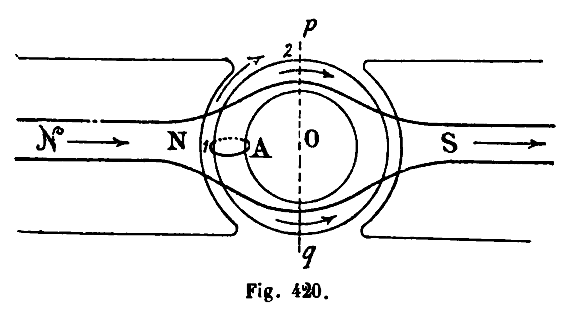


Fig. 420.

de flux $\frac{\mathfrak{N}}{2}$. Donc la spire A coupe, de la position 1 à la position 2, un flux $\frac{\mathfrak{N}}{2}$, et cela en un temps égal au quart de la durée d'un tour. Si la machine fait N tours par seconde, le temps nécessaire ponr aller de 1 à 2 est

$$\frac{1}{4\,N}$$

La force électromotrice moyenne d'induction, dans une spire, est le quotient de la variation de flux par le temps correspondant. On a donc

$$e = \frac{\frac{\mathfrak{N}}{2}}{\frac{1}{4\,N}} = 2\,N\,\mathfrak{N}$$

Mais toutes les boucles situées d'un même côté de la ligne neutre *pq* sont associées

en série; leurs forces électromotrices s'ajoutent. Donc si l'induit est formé de n tours de fil, la tension totale est due à $\frac{n}{2}$ de ces spires; elle égale

$$E = 2\,N\,\mathfrak{N} \times \frac{n}{2} = N\,\mathfrak{N}\,n$$

Elle est exprimée en unités électromagnétiques CGS. Pour passer à la valeur de E en volts, on tient compte de la relation posée,

$$1 \text{ volt} = 10^8 \quad \text{U E} - \text{M} \quad \text{CGS}$$

d'où

$$E = N\,\mathfrak{N}\,n \times 10^{-8} \text{ volts.}$$

Nous déduisons plusieurs conséquences de cette formule :

1° La force électromotrice moyenne d'une dynamo est proportionnelle à sa vitesse de rotation.

Comme application, supposons que nous relevions la caractéristique externe d'une machine; en même temps que nous notons le voltage et le débit correspondant à un régime donné, nous déterminons la vitesse et, par une règle de trois, nous ramenons le voltage à la valeur qu'il aurait si la vitesse avait sa valeur normale.

2° Elle varie en raison directe du flux de force qui traverse l'induit ;

3° Sa grandeur est encore proportionnelle au nombre des spires enroulées sur l'armature.

Ces lois ne sont qu'approximatives pour plusieurs raisons :

1° Nous avons négligé la dissymétrie du champ magnétique ;

2° Nous avons supposé toutes les spires de droite et toutes les spires de gauche agissant d'une façon utile. Il faudrait, pour que l'on pût raisonner ainsi, avoir au collecteur autant de lames qu'il y a de spires dans l'induit. Dans la pratique, chaque section reliée au collecteur comprend un certain nombre de boucles et l'on a des variations dans la valeur de la force électromotrice. Ces fluctuations sont d'ailleurs d'autant moins sensibles que le nombre des sections est plus considérable.

Remarque. — Le calcul exécuté pour le cas d'un anneau est applicable sans modification à un tambour, un conducteur suivant une génératrice remplaçant maintenant une spire de l'enroulement précédent.

Force électromotrice d'une dynamo multipolaire. — Supposons quatre pôles et soit encore $\mathfrak{N}$ le flux émanant de l'un d'eux et traversant l'induit. Prenons une spire devant un pôle et se dirigeant vers la ligne neutre voisine (*voir* fig. 402, p. 381).

Au point de départ le flux est nul; à la ligne neutre il atteint la valeur $\frac{\mathfrak{N}}{2}$ car la spire reçoit toute la moitié du flux qui se dirige vers la position actuelle. Entre les deux

instants s'est écoulé un temps égal au huitième du temps nécessaire à une révolution entière, soit

$$\frac{1}{8\,N}$$

si la dynamo fait N tours par seconde. On a dès lors, dans une spire, une f. é. m. égale à

$$e = \frac{\frac{\mathfrak{M}}{2}}{\frac{1}{8\,N}} = 4\,N\,\mathfrak{M}$$

Admettons un induit *en parallèle* ; le quart des spires (anneau) ou des conducteurs périphériques (tambour) est intéressé à la production de la tension. Dès lors la valeur de la f. é. m. totale est donnée par

$$E = e \times \frac{n}{4} = n\,N\,\mathfrak{M} \text{ unités CGS}$$
$$= n\,N\,\mathfrak{M} \times 10^{-8} \text{ volts}$$

L'expression est alors la même que dans le cas d'une machine bipolaire pour des flux égaux émanant des pôles mais le débit croît proportionnellement au nombre de ces pôles.

Si l'on désire atteindre un *voltage assez fort* pour un *débit modéré*, l'emploi d'une machine multipolaire ne procure donc aucun avantage, même pour une puissance considérable. Le cas se présente dans les transports d'énergie : par raison d'économie, le courant doit être à haute tension et l'on peut faire usage d'une dynamo bipolaire ; la figure 372 (page 363) nous a montré une machine type Manchester, construite par la *Société d'Œrlikon*, avec enroulement *annulaire* et excitation *en série*, utilisable surtout quand l'énergie transportée doit être recueillie sur un arbre unique. Cette dynamo est capable de débiter 75 ampères sous 2000 volts ; sa puissance égale donc 150 kilowatts.

Voltage aux bornes de la dynamo. — Cette différence de niveau n'est qu'une fraction de la force électromotrice de la dynamo et sa valeur dépend des conditions dans lesquelles la machine fonctionne. La résistance extérieure modifie en effet, ici comme dans les piles, la chute de potentiel dans le conducteur extra-polaire. D'autre part, le mode d'excitation exerce une influence très notable sur cette valeur.

1° Soit une *dynamo à excitation séparée* — une magnéto se comporterait de même. — La force électromotrice totale étant E, portons sur un axe vertical la longueur OE = E (fig. 421) et sur la ligne horizontale, faisons OA égal à la résistance intérieure r (fil induit) et AB égal à la résistance du circuit extérieur. La chute de potentiel se fait, partie dans le fil de la bobine, partie dans le conducteur extérieur. La droite EB représente donc, par ses ordonnées, le niveau électrique aux divers points



du circuit. Entre les deux extrémités A et B du fil principal, nous avons la différence AA' = e donnée par l'équation,

$$\frac{e}{E} = \frac{R}{R + r}$$

d'où

$$e = E \times \frac{R}{R + r} = E \times \frac{1}{1 + \frac{r}{R}}$$

Plus la résistance extérieure est considérable, plus le voltage utile e est grand, relativement à E total.

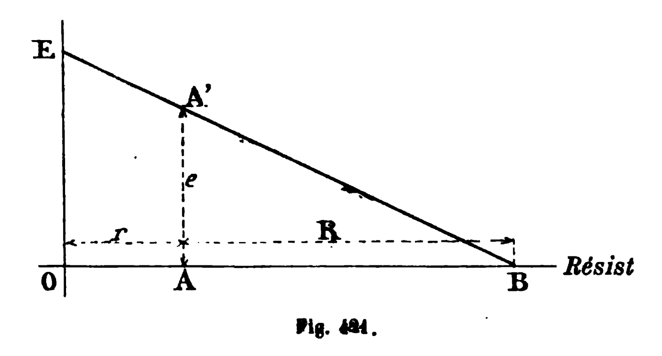


Fig. 421.

2° Soit maintenant une *dynamo-série*. Le courant engendré circule à la fois dans l'induit, dans les inducteurs et dans le circuit extérieur. Représentons (fig. 422) les

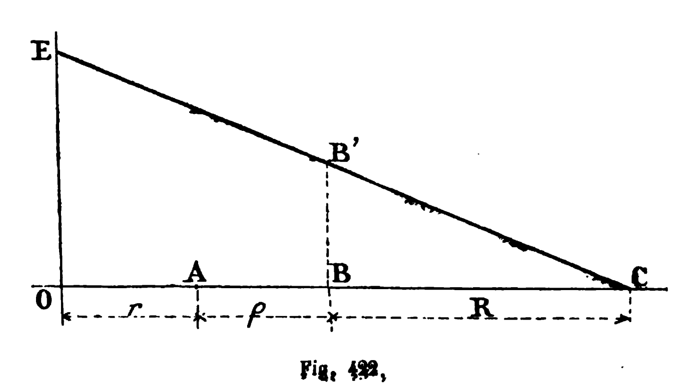


Fig. 422.

trois résistances respectivement en 0A, AB et BC; le voltage utile BB' est donné par

$$\frac{e}{E} = \frac{R}{R + r + \rho}$$

ou

$$e = E \times \frac{1}{1 + \frac{r + \rho}{R}}$$

formule qui nous conduit à la même conséquence que précédemment.

3° Enfin dans une *dynamo-shunt*, le courant trouve à sa sortie de l'induit, deux circuits en dérivation l'un par rapport à l'autre : le conducteur principal et le circuit d'excitation (fig. 423). Comme nous l'avons vu dans l'étude des courants dérivés, ce double chemin présente à l'électricité une résistance R' liée aux

Fig. 423.

Fig. 424.

résistances R et ρ des déviations par la formule :

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R} + \frac{1}{\rho}$$

Portons encore (fig. 424) sur l'axe horizontal les valenrs $OA = r$ et $AB = R'$.

On a alors, entre les extrémités du fil principal ou de la dérivation, une chute de potentiel $e = AA'$

$$\frac{e}{E} = \frac{R'}{R' + r}$$

d'où nous tirons :

$$e = E \times \frac{R'}{R' + r} = E \times \frac{1}{1 + \frac{r}{R'}} = E \times \frac{1}{1 + r\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\rho}\right)}$$

Dans ce cas nous arrivons encore à ce résultat que le voltage utile croît, par rapport au voltage total, à mesure que nous augmentons la résistance extérieure et la résistance des inducteurs.

Puissance de la machine. — Si on appelle I l'intensité du courant circulant dans l'anneau et E la force électromotrice de la dynamo, on a une puissance, c'est-à-dire une énergie disponible chaque seconde, de

$$P = E \times I$$

Nous pouvons remplacer E par sa valeur et alors il vient

$$P = n\, N\, \mathfrak{N}\, I$$

Si $\mathfrak{N}$ est exprimé en CGS en I en ampères, la puissance est :

$$P = n\, N\, \mathfrak{N}\, I \times 10^{-8} \text{ watts}$$

Le plus souvent dans la pratique, c'est en kilowatts qu'on énonce la puissance d'une dynamo:

$$P = n\, N\, \mathfrak{N}\, I \times 10^{-11} \text{ kilowatts}$$

Cette puissance n'est pas tout entière utilisée. D'après ce que nous avons dit, la différence de potentiel employée e est inférieure à E, et, d'autre part, l'intensité dans le fil d'utilisation i n'est pas forcément égale à l'intensité I du courant produit. On a donc une puissance utilisable p

$$p = e \times i \text{ watts}$$

e étant donné en volts et i en ampères.

On peut, dans chaque cas particulier, trouver cette valeur p.

Rendement industriel d'une dynamo. — On nomme *rendement industriel* ou encore *commercial* d'une dynamo, le rapport qui existe entre sa puissance électrique utile ei et la puissance totale $\mathfrak{P}$ qu'elle absorbe au moteur qui l'entraîne. On a donc:

$$\mathfrak{R}_{indust} = \frac{e\,i}{\mathfrak{P}}$$

On évalue ce rapport qui est d'importance capitale: pour cela, faisant tourner la dynamo à la vitesse normale sur le circuit habituel, on note:

1° e au voltmètre, entre les extrémités du circuit.

2° i au moyen d'un ampèremètre placé sur le conducteur.

Le produit ei donne la puissance en watts; on l'aurait d'ailleurs directement avec un wattmètre et cette quantité est évaluée dans tous les cas avec une grande précision;

3° Il nous faut ensuite la puissance consommée par la dynamo. On y arrive au moyen d'un frein (de Prony par exemple) ou d'un dynamomètre de transmission. Mais l'approximation est faible. Cette quantité s'exprime en kilogrammètres par seconde; une multiplication par 9,81 donne le nombre de watts: $\mathfrak{P}$. Le rapport des deux valeurs est égal au rendement industriel.

Cette fraction est très variable d'une machine à une autre. Si l'on rapproche tous les chiffres trouvés pour des types variés, on peut dire que la plus grande valeur atteinte est 94 0/0. Ce chiffre n'est relatif qu'aux machines de grande puissance. Pour les petites dynamos, le fonctionnement est moins avantageux; le rendement descend à 90 0/0 au maximum pour une puissance inférieure à 20 kilowatts, et baisse davantage encore pour de plus faibles machines.

Il y a donc, dans la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique, une perte d'au moins 6 0/0 (ce qui est extrêmement peu d'ailleurs si on compare ce rendement à celui des machines à vapeur).

Les pertes proviennent de causes mécaniques et de causes électriques.

1° Les pertes *d'ordre mécanique* sont dues aux frottements: de l'arbre dans les coussinets, des balais sur le collecteur.



Par une disposition convenable des inducteurs (type inférieur, ou supérieur muni de cornes polaires) on arrive à diminuer beaucoup la pression sur les paliers ; quant aux balais, on les met de façon à assurer le contact sans presser inutilement la partie mobile.

2° Bien plus nombreuses sont les *causes électriques* de perte d'énergie. Nous pouvons les ranger dans les trois classes suivantes :

a) Echauffement des divers conducteurs. C'est la loi de Joule qui régit cette perte. Nous savons que, dans un fil, la chaleur dégagée est proportionnelle à la résistance du conducteur et au carré de l'intensité du courant. On doit donc, pour trouver cette absorption d'énergie, faire la somme des termes tels que Ri^2 relatifs à l'armature et à l'enroulement des inducteurs.

b) Les *courants de Foucault* dans le fer de l'armature. L'intensité de ces courants est très forte car la résistance rencontrée par l'électricité est négligeable ; il en résulte le dégagement d'une certaine quantité de chaleur et cela aux dépens de l'énergie communiquée à la machine. Nous savons comment on peut éviter ces courants par la division de l'armature. Mais cet effet a lieu non seulement dans l'âme du noyau ; il se produit encore dans les fils eux-mêmes si leur section est suffisante. Cela est sensible dans les machines à grand débit (dynamos pour la métallurgie notamment). On évite cet inconvénient en remplaçant les *barres* de cuivre, formant l'induit dans ces machines, par des séries de fils isolés les uns des autres.

c) L'*hystérésis* est la dernière perte électrique. Le retard à l'aimantation et à la désaimantation du fer produit, à chaque cycle, une perte de puissance qui dépend du volume de l'anneau et de l'induction à laquelle le fer est soumis. Si on connaît à ce point de vue le corps magnétique qui entre dans la confection de la machine, on peut *facilement trouver la perte* de puissance faite de ce chef.

Voici, à titre d'exemple, comment on peut évaluer sur une machine en marche, les pertes dues à ces divers facteurs. L'expérience a été faite au Laboratoire d'électricité de l'Ecole d'Angers sur une dynamo de 4400 watts (40 ampères, 110 volts),

1° *Frottements, hystérésis, courants de Foucault.* — On fait marcher la machine comme moteur et à vide et l'on note les constantes du courant nécessaire, soit :

110 volts
2,2 ampères

La puissance absorbée pour vaincre ces résistances passives est donc :

$$110 \times 2{,}2 = 242 \text{ watts}$$

2° *Effet Joule dans l'induit.* — La résistance du fil induit a été évaluée *à chaud*, par la méthode de l'ampèremètre et du voltmètre ; résultat :

$$R = 0{,}175$$

D'autre part, le régime normal de la dynamo étant de 40 ampères et l'excitation exigeant un courant :

$$i = 1{,}4 \text{ ampères}$$

nous avons dans l'induit à pleine charge (excitation dérivée)

$$I = 41,4 \text{ ampères}$$

La perte dans l'induit est donc :

$$0,175 \times 41,4^2 = 300 \text{ watts}$$

3° *Effet Joule dans les inducteurs.* — L'intensité i du courant d'excitation ayant été trouvée égale à 1,4 et le voltage aux bornes étant 110, nous obtenons pour puissance consommée :

$$110 \times 1,4 = 154 \text{ watts}$$

La perte totale est donc :

$$242 + 300 + 154 = 696 \text{ watts}$$

et le rendement industriel ressortit à la valeur :

$$\frac{4400}{4400 + 696} = 86,3 \ 0/0$$

Les pertes, 13,7 0/0 se répartissent dès lors de la manière suivante :

Effet Joule	Fil induit	5,9 0/0
	Fil inducteur	3,0 »
Frottements, hystérésis, courants de Foucault.		4,8 »
	Total. . . .	13,7 0/0

Rendement électrique d'une dynamo. — Il est bon dans l'étude de la machine, de faire la part des pertes, et, pour y arriver, on considère le *rendement électrique*. C'est le rapport de la puissance électrique *utile* $e\,i$ et de la puissance électrique *totale* EI.

$$\mathfrak{R}_{\text{élect}} = \frac{e\,i}{E\,I}$$

Cette fraction fait intervenir la perte par effet Joule seulement; le rendement électrique des fortes dynamos atteint au maximum 96 0/0 environ.

Rendement brut d'une dynamo. — Ce rendement, que l'on considère quelquefois, est le rapport de la puissance totale électrique de la machine à la puissance prise au moteur.

Ainsi on a :

$$\mathfrak{R}_{\text{brut}} = \frac{E \times I}{\mathfrak{P}}$$

Relations entre les divers rendements. — On a identiquement :

$$\frac{e\,i}{\mathfrak{P}} = \frac{e\,i}{E\,I} \times \frac{E\,I}{\mathfrak{P}}$$

d'où

$$\mathfrak{R}_{\text{ind}} = \mathfrak{R}_{\text{élect}} \times \mathfrak{R}_{\text{brut}}$$

Cette formule nous permet de calculer $\mathcal{R}_{brut}$ si nous connaissons les deux autres fractions. Ainsi dans le cas du maximum cité précédemment, nous avons :

$$\mathcal{R}_{brut} = \frac{\mathcal{R}_{ind}}{\mathcal{R}_{élect}} = \frac{0{,}94}{0{,}96} = 0{,}979$$

Calage des balais. — Nous savons par expérience que, dans une machine à deux pôles horizontaux, on doit caler les balais en dehors de la verticale si on veut éviter les étincelles au collecteur.

Les causes de ce déplacement des balais sont au nombre de deux :

1° La ligne neutre n'est pas dans une position symétrique par rapport à la ligne des pôles ; elle avance d'un certain angle, dans la direction du mouvement.

2° Pour supprimer les étincelles, on doit appliquer les balais en avant de la véritable ligne neutre.

1° Cherchons d'abord quelle est la *position réelle de la ligne neutre*. Et pour cela remarquons que l'aimantation de l'armature de fer doux est due à deux causes : à l'influence des pôles inducteurs N et S, d'où deux pôles S' et N' en regard des premiers (fig. 425) et à l'action du courant induit lui-même. Ce courant est formé, comme on l'a trouvé, de deux parties opposées l'une à l'autre et dont les actions, concordantes à ce point de vue, produisent à la partie supérieure, en *s* un pôle Sud, en *n*, un pôle Nord ; les deux aimantations peuvent se combiner : elles donnent un pôle Sud résultant $\mathcal{S}$; un pôle Nord en $\mathcal{N}$. La ligne des pôles devient $\mathcal{N}\mathcal{S}$ et la ligne neutre perpendiculaire à $\mathcal{N}\mathcal{S}$ est pq. Le champ magnétique présente donc une dissymétrie complète et

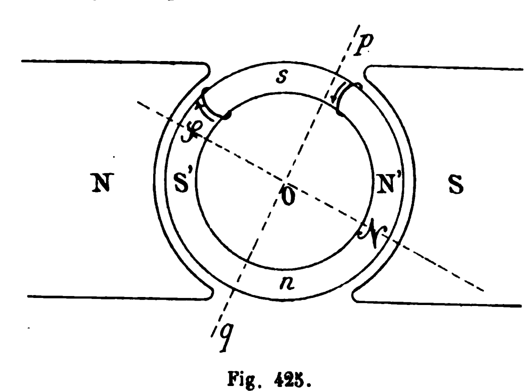


Fig. 425.

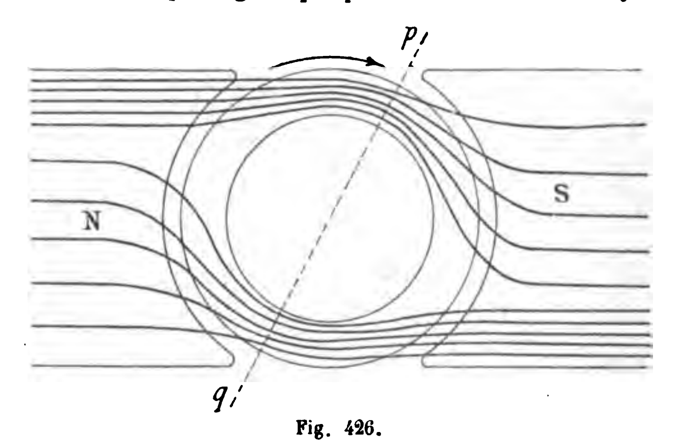


Fig. 426.

les lignes de force sont le plus serrées possible dans la direction pq. La fig. 426 montre cette distorsion exagérée à dessein.

Remarquons d'ailleurs que l'effet est d'autant moindre que le champ magnétique des inducteurs dans l'armature approche davantage de la saturation.

2° *Les balais doivent toucher le collecteur en deux points situés en avant de la ligne neutre* que nous venons de déterminer.

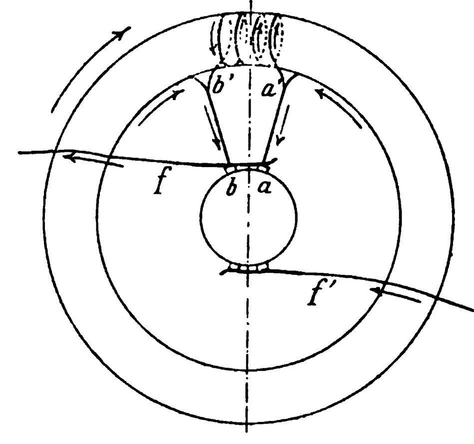


Fig. 427.

Considérons, en effet, les balais calés sur la ligne neutre (fig. 427. Un frotteur f appuie à la fois sur deux touches telles que a et b et la bobine comprise entre les deux est alors mise en court-circuit. Mais, à un moment donné, la pièce a entraînée dans le sens du mouvement, quitte le balai ; c'est alors que l'étincelle peut avoir lieu ; pour qu'elle ne se produise pas, il est assez facile de trouver qu'il suffit de diminuer, au-dessous d'une certaine limite, la densité (1) du courant qui traverse a au moment de la rupture. Or cette densité dépend d'un certain nombre de facteurs.

1° Nous avons en effet à tenir compte des courants induits dans les deux moitiés de l'anneau, figurés par deux flèches se dirigeant vers a' et b' et passant ensuite dans le balai f par deux portions des lames a et b, contacts de résistances variables avec le temps.

2° La section a' b' est en court-circuit ; généralement une force électromotrice e y prend naissance en raison de la variation du flux inducteur pendant le court-circuit.

3° Enfin la self-induction y développe encore une différence de potentiel dont il faut tenir compte.

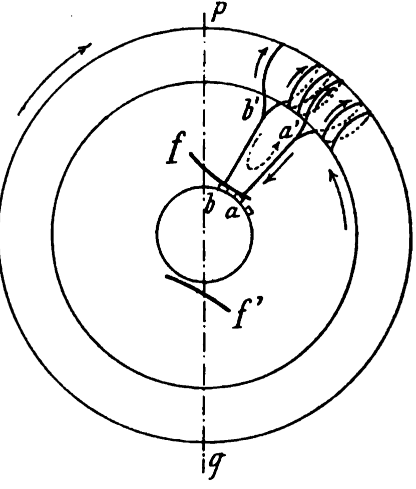


Fig. 428.

Il est facile d'abord de montrer dans *quel sens* les balais devront être déplacés : il faut en effet que le courant a' a soit contrarié par le courant dû à e, f.é.m. dite *de renversement* produite dans a' b'. La condition nécessaire est que b' soit à un potentiel supérieur à a'.

On voit de suite que la position supposée dans la figure est défectueuse car la section en court-circuit est à cheval sur les deux moitiés de l'induit, aucune f. é. m. n'y prend donc naissance et la densité du courant ne peut s'annuler.

Mais il est possible d'adopter la position de la figure 428 : mettre les balais en avance sur la ligne neutre : nous obtenons ainsi une f. é. m. de renversement dont le sens est figuré

(1) On sait que la densité est l'intensité d'un courant divisée par la section du conducteur.

par la flèche pointillée et qui tend à diminuer le courant en a au moment de la rupture.

On comprend que si on avait calé les balais en arrière de la ligne neutre, on aurait, par ce fait, augmenté le courant qui se coupe en a et par conséquent l'étincelle aurait été plus nourrie.

Nous savons dans quel sens il convient de déplacer les balais; il nous reste maintenant à étudier d'une façon un peu plus complète, ce phénomène important : la densité du courant doit, comme nous l'avons dit, tomber au-dessous d'une certaine limite si nous voulons pratiquement supprimer les étincelles aux balais.

Nous allons indiquer la valeur de la densité à la rupture, expression tirée du calcul, et nous aurons à la discuter pour trouver les conditions qui agissent sur le calage.

Si on appelle :

δ la densité du courant à la rupture ;

R la résistance de la bobine en court-circuit ;

L le coefficient de self de cette bobine.

e la force électromotrice qui s'y induit pendant le court-circuit

I l'intensité du courant produit dans une moitié de l'induit.

r la résistance de contact du balai avec le collecteur.

T la durée du contact du balai avec une touche.

On trouve

$$\delta = K \left[\frac{(R + 2r)\, I - e}{r\, T - L}\right]$$

Nous tirons de cette formule quelques renseignements :

1° Soit une dynamo donnée, marchant à un régime déterminé (débit = I). Nous pouvons alors considérer δ comme une fonction de e (f. é. m. de renversement) et la courbe représentative est une droite A B (fig. 429).

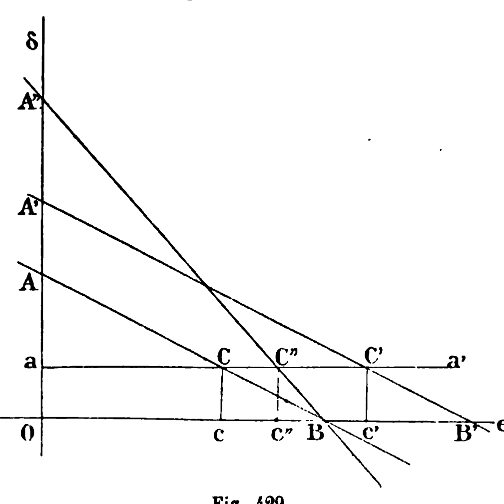


Fig. 429.

Supposons que l'expérience ait fixé la valeur maxima de la densité compatible avec l'absence d'étincelles ; soit Oa cette valeur; menons la droite aa' qui coupe AB en un point C : l'abscisse Oc indique la f. é. m. qui correspond à la densité fixée. Nous devrons donc décaler nos balais de façon à rencontrer la f. é. m. Oc, c'est-à-dire d'un angle d'autant plus grand que Oc est plus considérable.

2° *Variation du décalage avec le débit.* — Lorsque l'intensité du courant varie, la droite représentative de δ en fonction de e change. Comme on le voit aisément, la nouvelle droite est parallèle à l'ancienne. Supposons en particulier que I augmente;

A'B' remplace AB et coupe au point C' la ligne *aa'*; il faut donc, pour obtenir la commutation sans étincelles, décaler les balais plus que dans le premier cas.

3° *Variation du décalage avec le coefficient de self.* — Supposons que, toutes choses égales, le coefficient de self d'une section subisse une augmentation; la nouvelle droite représentative est, comme le montre la formule, A'' B: la f.é.m. de renversement doit donc être O*c*''; il faut décaler par conséquent les balais d'autant plus que la self induction est plus grande.

4° *Variation du décalage avec la résistance de contact des balais.* — Si nous divisons le numérateur et le dénominateur de la fraction par *r*, nous voyons que si *r* augmente, δ diminue, ce qui explique l'avantage des balais en charbon dans certaines conditions.

5° *Variation du décalage avec l'excitation.* — L'augmentation de l'excitation produit deux effets :

a) Accroissement de *e* pour une position donnée de la section ;

b) Diminution du coefficient de self, par saturation du fer.

Ces deux effets concourent à diminuer l'angle de décalage.

On peut enfin comparer, au point de vue du décalage, un induit à tambour et un autre annulaire et l'on trouve que le tambour exige un moindre déplacement des balais.

Effets du décalage des balais. — Ils sont de différentes natures :

1° *Diminution du nombre de spires utiles dans la dynamo.* — En effet, la ligne neutre étant *pq* et celle des balais *ab* (fig. 430), nous avons entre les deux balais, et d'un côté de l'anneau, deux sortes de spires :

a) Celles de l'angle *a* O*q* ou β qui sont toutes sièges de f. é. m. concordantes ;

b) Celles de l'angle *q*O*b* ou α donnant des courants inverses des précédents.

Ces courants contraires se retranchent, de sorte qu'il reste comme spires actives celles qui recouvrent un angle :

$$\gamma = \beta - \alpha$$

Or

$$\beta = \pi - \alpha ;$$

il vient donc :

$$\gamma = \pi - 2\alpha$$

Fig. 430.

On perd ainsi le bénéfice des boucles situées dans un angle double de l'angle de calage par rapport à la ligne neutre, d'où une diminution de la f. é. m.

2° *Production dans l'induit d'un flux antagoniste à celui des inducteurs.* — Considérons encore une machine bipolaire à anneau (fig. 431) et marquons, par de petites flèches radiales, les sens des courants qui circulent à la partie antérieure de l'induit. Voyons ce qui se passe dans la moitié supérieure seulement :

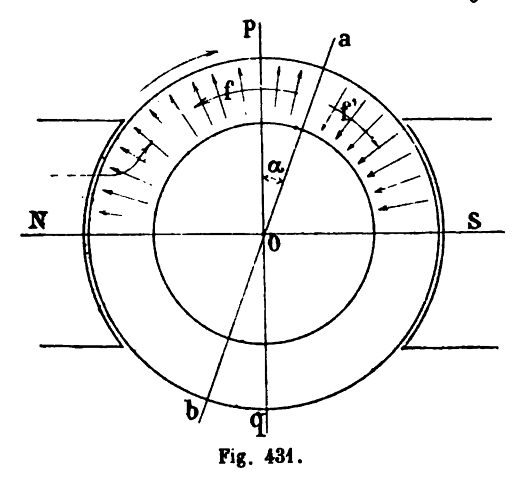


Fig. 431.

a) Les boucles de l'angle N O *a* donnent naissance à un flux indiqué par la flèche *f*.

b) celles de l'angle *a* O S produisent des lignes de force, telles que *f'*, contraires des précédentes.

Or le premier angle a pour mesure $\frac{\pi}{2} + \alpha$; le second $\frac{\pi}{2} - \alpha$; il en résulte que les ampères-tours marqués par *f* sont plus importants que ceux qui sont représentés par *f'*. La différence correspond à l'angle :

$$\frac{\pi}{2} + \alpha - \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = 2\,\alpha$$

de sorte que, s'il y a *n* spires sur tout l'anneau, le nombre des tours situés dans l'angle $2\,\alpha$ est

$$\frac{n\,\alpha}{\pi}$$

et, en appelant I l'intensité du courant débité ($\frac{I}{2}$ dans chaque moitié de l'anneau) les *ampères-tours-antagonistes* ont pour valeur :

$$\frac{n\,\alpha\,I}{2\,\pi}$$

Ils se retranchent des ampères-tours inducteurs et c'est encore là une nouvelle cause de diminution pour la f. é. m. de la dynamo. On conçoit que ces ampères-tours antagonistes ont d'autant moins d'effet que l'armature approche davantage de la saturation magnétique.

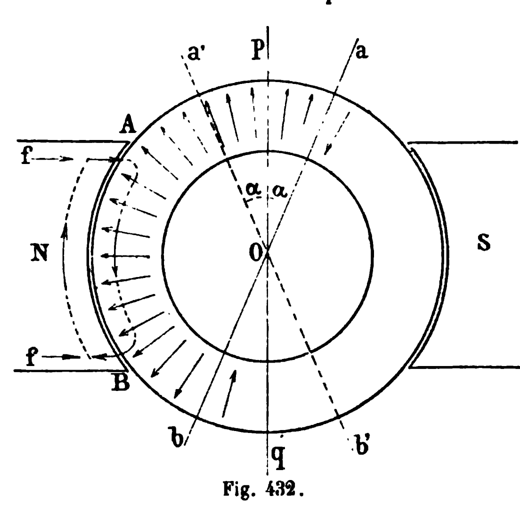


Fig. 432.

Flux transversal. — Nous avons vu que les spires contenues dans un angle 2α, soit $a'Oa$ (fig. 432) produisent un *flux antagoniste*. Considérons maintenant les boucles situées dans l'angle $a'Ob$: elles donnent naissance à des lignes de force marchant (dans la partie gauche de l'anneau) de haut en bas. Ces lignes se ferment

sur elles-mêmes, comme le montre la figure, en empruntant une partie de la pièce polaire N et il en résulte :

1° Une augmentation du flux inducteur (représenté par la flèche f) dans la deuxième moitié A de la pièce polaire rencontrée par les spires ;

2° Une diminution du flux f dans la première moitié B rencontrée.

L'augmentation égale évidemment la diminution et le flux résultant ne change pas ; on ne doit conclure qu'à une répartition inégale du flux dans l'étendue des pièces polaires. Ce phénomène peut présenter des inconvénients. Plusieurs moyens ont été indiqués pour le combattre ; le principal, que nous avons déjà signalé dans quelques machines consiste à pratiquer, dans les pièces polaires et dans les noyaux inducteurs, un certain nombre de saignées longitudinales, lesquelles s'opposent à la propagation de ces lignes de force parasites (voir fig. 388).

Réaction d'induit. — Nous avons indiqué (voir page 346) ce fait que le voltage aux bornes d'une dynamo en fonctionnement est inférieur à la différence de potentiel constatée à vide. On donne à cette perte de tension le nom de *réaction d'induit.* La réaction d'induit est due à plusieurs causes que nous connaissons :

1° A la chute de potentiel dans la dynamo, d'après la loi d'Ohm :

2° Au décalage des balais, par le flux antagoniste surtout.

Nous avons donné déjà (fig. 351) la courbe :

$$\varepsilon = f(\mathrm{I})$$

indiquant cette chute de tension en fonction du débit. Cette ligne part de l'origine évidemment ; elle présente d'abord une partie rectiligne et en effet, pour une petite valeur de I, le décalage des balais est nul et la perte de voltage est réglée simplement par la loi d'Ohm ; mais pour une intensité considérable, le décalage nécessaire croissant provoque un flux antagoniste dont l'action augmente d'une part *avec ce décalage* et de l'autre *avec le débit* ; il en résulte que la courbe monte assez rapidement au-dessus de la ligne droite.

Remarquons encore que l'action du flux antagoniste est d'autant plus réduite que le flux des inducteurs approche davantage de la saturation dans l'armature ; nous voyons donc ce fait, accusé encore par la figure 351 : la réaction d'induit est moindre pour les fortes excitations que pour les excitations faibles.

Suppression du décalage des balais. — Nous avons vu que les étincelles aux balais sont empêchées par la production, dans la section en court-circuit, d'une f. é. m. de grandeur convenable. Cette nécessité, de trouver dans la section $a' b'$ (fig. 428) une tension suffisante, nous a obligés à décaler les balais vers des potentiels croissants mais nous pourrions établir entre a et b la différence de potentiel voulue par un moyen convenable quelconque : alors nous n'aurions plus à décaler les balais.

Indiquons deux des solutions proposées :

1° Celle de *Sayers* consiste à relier les entre-sections de l'induit, aux diverses lames



du collecteur non directement mais par l'intermédiaire des spires supplémentaires α, β, γ, etc. (fig. 433). Considérons dès lors la section CD et supposons-la à cheval

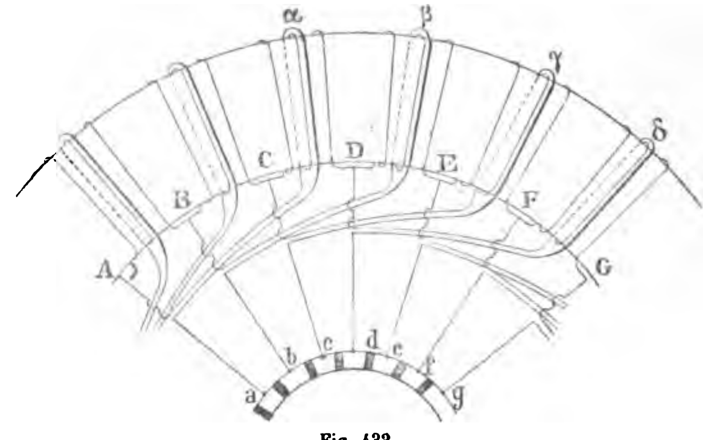


Fig. 433.

sur la ligne neutre : aucune différence de potentiel ne prend naissance dans C D évidemment, mais γ disposé *en avance* est le siège d'une f. é. m. ; δ de même, de sorte que la différence des deux tensions se trouve établie entre les points C et D : elle peut être capable, si les enroulements sont bien calculés, d'assurer la commutation sans étincelles ;

2° La méthode employée dans les dynamos *Sautter-Harlé* consiste à disposer de petits pôles complémentaires entre les pôles inducteurs principaux. On voit (fig. 434) une machine tétrapolaire munie de ce dispositif. La carcasse en acier doux porte quatre noyaux venus de fonte avec elle, les noyaux sont évidés de même que les pièces polaires rapportées. On voit, dans les intervalles, quatre noyaux plus petits que les premiers et vissés sur la carcasse.

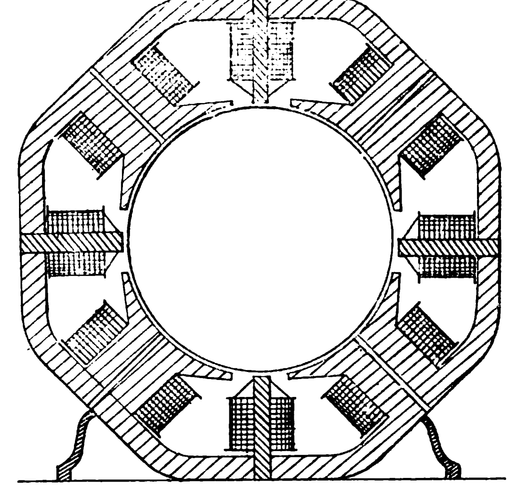


Fig. 434.

Les noyaux principaux sont recouverts de deux enroulements, l'un dérivé, l'autre en série (la dynamo est compound) ; quant aux pôles supplémentaires, ils reçoivent seulement un enroulement série avec les spires de compoundage : dans ces conditions, la f. é. m. créée, dans les spires en court-circuit, par ces inducteurs supplémentaires, est variable — d'autant plus considérable que la machine débite davantage. On peut donc, au moyen d'un enroulement bien calculé, compenser les effets du débit et éviter le déplacement des balais. L'expérience a en effet montré que la dynamo figurée, construite pour 1.100 ampères peut en débiter 1.500 sans étincelles.

CHAPITRE VI

INSTALLATION, MARCHE ET ENTRETIEN DES DYNAMOS

Moteurs employés pour actionner les dynamos. — Le plus souvent on fait usage de machines à vapeur mais la vitesse de ces moteurs n'est pas toujours celle qu'exigerait la dynamo. Dans ce cas il faut un organe intermédiaire, courroie ordinairement, qui absorbe une partie de l'énergie mécanique.

Pour éviter cette perte et aussi pour diminuer l'encombrement, on s'est attaché à augmenter d'une part la vitesse des machines à vapeur et à diminuer d'autre part celle que demandaient les dynamos; on sait que l'emploi d'inducteurs multipolaires permet de réaliser ce second point. On peut dès lors entraîner directement la machine électrique par le moteur; la figure 419 (page 394) nous a fait voir déjà une dynamo de la *Société alsacienne* dont l'arbre n'était que le prolongement de celui de la machine à vapeur. Dans certains cas, cette partie électrique, forcément de masse considérable, montée directement sur l'arbre moteur, peut tenir lieu de volant à la machine.

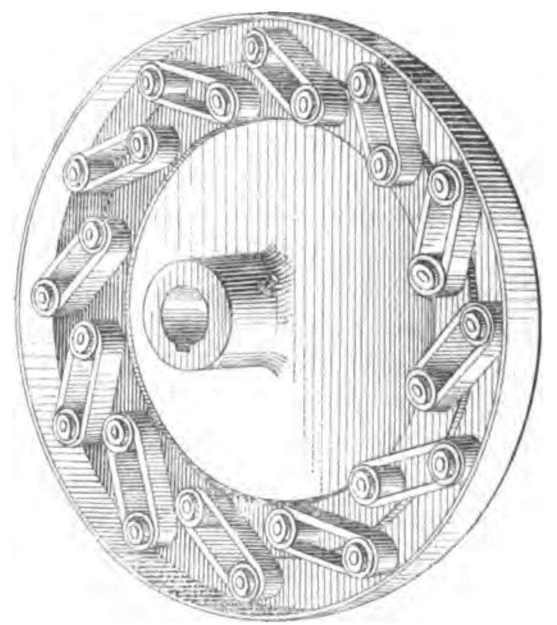


Fig. 435.

Mais le couplage direct présente quelquefois des inconvénients : variations brusques de vitesse, pertes d'électricité par conductibilité de l'axe, échauffement de la dynamo, etc. On les supprime par l'emploi d'un lien élastique entre les deux arbres. Un des systèmes les plus répandus est l'accouplement Raffard. Chaque bout d'arbre porte un plateau et les deux peuvent s'emboiter l'un dans l'autre avec jeu, de manière à mettre à peu près sur un même plan les deux faces qui se regardent (fig. 435). Ces faces sont munies de broches métalliques en nombre égal sur les deux parties. C'est entre ces broches, entourées de douilles en métal antifriction, qu'a lieu la liaison. Des

bagues de caoutchouc retiennent deux à deux toutes ces tiges métalliques. On a là un mode d'entraînement très doux et en cas de surcharge momentanée trop brusque, il n'y a à craindre d'autre accident que la rupture des bagues.

Dans l'établissement de la puissance à développer par le moteur qui doit entraîner la dynamo, il est bon de tabler sur une certaine perte d'énergie. Ordinairement pour des machines moyennes, on compte de 20 à 25 0/0 en plus de la puissance exigée par la dynamo.

Exemple : Soit une machine électrique devant donner 500 ampères sous 110 volts.

$$P = 500 \times 110 = 55.000 \text{ watts}$$
$$= \frac{55.000}{736} = 75 \text{ chevaux environ.}$$

On devra demander au moteur :

$$75 + (75 \times 0{,}20) = 90 \text{ chevaux au moins.}$$

La consommation de vapeur est de 6 à 11 kilogrammes par cheval-heure pour une machine de puissance moyenne. Cela correspond à une dépense de charbon de 0,850 kilogramme à 1,57 par cheval et par heure. On recueille alors au maximum 6 à 7 0/0 de l'énergie du charbon.

Les moteurs à gaz et à pétrole sont aussi d'un usage commode. Ces moteurs rendent jusqu'à 14 0/0 de l'énergie du combustible. Ils doivent être munis de régulateurs et de volants puissants si l'on veut assurer au courant une certaine constance. Lorsqu'on emploie le gaz de ville, il faut compter sur une consommation de $\frac{1}{2}$ à 1 mètre cube de gaz par cheval-heure pour des moteurs de puissance moyenne. Quand il s'agit de puissance un peu forte, les moteurs à gaz pauvres sont plus économiques ; ils consomment d'ailleurs (A. Witz) moins que les machines à vapeur, soit environ par cheval-heure 750 grammes d'anthracite mélangé de coke (pour puissances moyennes).

Les turbines à vapeur sont encore admises à entraîner les dynamos. Parmi elles citons le modèle de Laval très répandu : sur un même socle sont souvent installées la turbine et la dynamo (du type de Manchester dans la figure 436). Pour des puissances inférieures à 20 chevaux, la turbine est simple ; mais pour des puissances supérieures jusqu'à 100 chevaux, et même au delà, il y a deux arbres et deux induits. On a ainsi deux courants distincts, ce qui permet de faire la distribution de l'électricité au moyen de trois fils, mode très économique comme nous le verrons.

Cet ensemble, connu sous le nom de turbine-dynamo, est très commode ; ses dimensions d'encombrement sont faibles et sa consommation de vapeur un peu moindre que celle des bonnes machines à vapeur. Elle possède un régulateur très bien étudié qui permet de faire entrer dans le circuit ou d'en retirer un nombre quelconque de lampes sans modifier le voltage.

Citons encore l'emploi, pour actionner les dynamos, des moteurs hydrauliques, roues et turbines. La plus importante des installations étudiées est celle des chutes du Nia-



gara. En France, on peut citer celle de Jonage, près Lyon, pour l'utilisation de la puissance du Rhône.

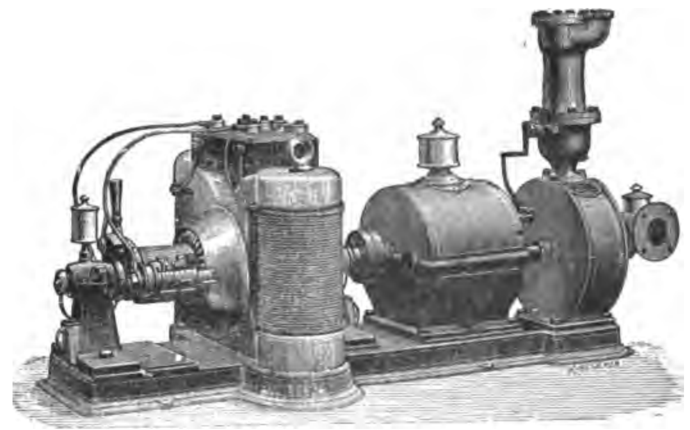


Fig. 436.

En Belgique, on se sert, dans certaines distributions, d'eau sous pression (50 kilogrammes par centimètre carré à Anvers) pour actionner de petites unités formées d'une turbine et d'une dynamo alimentant un arc.

Enfin, pour terminer citons les moteurs à air comprimé. Il existe à Paris une canalisation d'air sous une pression de 4 à 5 atmosphères.

Installation de la dynamo. — La machine doit être placée dans un lieu bien sec, à l'abri des poussières et surtout des poussières métalliques.

Ordinairement elle est montée sur un massif de maçonnerie.

On veille d'une manière toute particulière au bon isolement de la machine; pour cela il est important d'interposer entre la dynamo et la maçonnerie une charpente de bois ou encore des plaques isolantes. Les boulons de fixation eux-mêmes doivent être garantis par des rondelles et des tubes mauvais conducteurs de l'électricité. Il est facile, par les méthodes de mesure (*voir* page 312), d'évaluer l'isolement de la masse.

Remarquons d'ailleurs que cet isolement ne dispense pas d'exiger une grande valeur pour celui de chacun des conducteurs qui constituent la dynamo. Il est facile de *vérifier* le bon isolement au moyen d'une pile et d'un voltmètre reliés en série; l'une des extrémités du système d'essai est mise à la terre tandis que l'autre prend contact avec les parties à examiner : si l'isolement est bon le galvanomètre n'accuse pas de déviation.

Mise en marche et en charge de la dynamo. — La machine étant en place, sa partie mobile parfaitement libre et son arbre capable de prendre un léger déplacement suivant sa propre direction, on s'assure de l'intégrité de l'appareil de graissage et on met en marche *à vide* si la machine tourne pour la première fois. Il est bon, dans ce cas, d'examiner pendant quelque temps ce fonctionnement sans charge, d'observer si les écrous et bornes restent convenablement serrés, si la courroie est suffisamment tendue, si les paliers ne chauffent pas, etc.

Lorsqu'on n'a constaté rien d'anormal dans la dynamo, on charge *progressivement* en ayant soin de commencer par les circuits d'incandescence. Au fur et à mesure de la charge, on modifie, s'il y a lieu, la marche ou les rhéostats de réglage, d'après les indications du voltmètre branché sur les bornes.

Généralement, dans un service normal, on ferme les circuits de lampes à incandescence avant la mise en marche et on veille à ce que la tension ne dépasse pas celle qui est demandée par les appareils, les arcs ne sont mis en service qu'ensuite.

Arrêt de la dynamo. — Dans le cas de l'éclairage, on coupe ordinairement les circuits d'arcs avant d'arrêter la machine. Quant aux circuits d'incandescence, on les laisse en service et on ne les ouvre qu'après ralentissement notable. Jamais, en pleine marche, on ne doit couper le circuit par l'interrupteur général.

Entretien de la dynamo. — Les coussinets doivent être abondamment huilés. Le plus généralement, ils sont munis de graisseurs automatiques ; il n'y a alors qu'à entretenir la provision de lubrifiant. De temps en temps on renouvelle l'huile.

Il faut que les balais touchent le collecteur dans toute leur largeur et par leur extrémité seulement. S'ils sont métalliques, on taille le bout en biseau et on a soin d'éviter, par suite de l'usure, un trop large épanouissement du frotteur : le contact ne doit pas dépasser la largeur d'une lame et demie du collecteur. La pression entre les deux parties frottantes n'a pas besoin d'être très considérable car, inutilement, on provoquerait ainsi une usure rapide. Dans le cas de balais en charbon, l'usure est très faible.

Le collecteur demande à être tenu dans un parfait état de propreté ; il se nettoie avec du papier de verre 00, pas à l'émeri. On l'essuie ensuite avec un chiffon sec. Cette pièce ne doit jamais recevoir d'huile. Son nettoyage est répété de temps en temps pendant la marche de la machine et cela au moyen d'un linge bien propre entourant une règle de bois que l'on applique à plat contre les touches. On évite ainsi les dépôts métalliques qui pourraient occasionner des pertes d'énergie en faisant communiquer entre elles les lames voisines.

Le calage des balais doit être surveillé dans le but d'éviter les étincelles qui détériorent le collecteur. On est quelquefois obligé de faire au tour des passes légères sur cette pièce quand les étincelles ont jailli longtemps par suite d'un manque de surveillance.

Accidents qui peuvent survenir. — Ils sont assez nombreux et nous ne pourrons pas tous les prévoir. Nous distinguerons les trois cas suivants :

1° La dynamo ne débite pas de courant ;

2° Les balais crachent ;

3° Il y a un échauffement anormal.

1° *Si la dynamo ne débite pas*, cela est dû généralement :

a) A un mauvais contact aux bornes ou aux autres connexions. On fera bien de porter son attention immédiatement de ce côté ;

b) A un défaut d'amorçage. On s'en aperçoit à l'absence d'aimantation des pièces polaires.

Souvent on peut provoquer l'amorçage immédiat :

Dans une dynamo-série en fermant la machine sur un plomb fusible (en court-circuit par conséquent).

Dans une dynamo-shunt, en soulevant les balais et en alimentant, pendant quelque temps les inducteurs par un courant emprunté à une source étrangère.

c) A l'isolement défectueux des diverses pièces et enroulements et aussi à des courts-circuits accidentels. Pour trouver ces défauts, il est nécessaire d'opérer méthodiquement au moyen d'une pile et d'une sonnerie ou d'un galvanomètre.

2° *De fortes étincelles*, quand la machine débite, sont ordinairement imputables soit à un calage défectueux soit au mauvais état des balais ou du collecteur.

3° *L'échauffement anormal des enroulements* est la conséquence d'une surcharge ou d'un court-circuit que l'on peut trouver. L'élévation de température des paliers a pour cause ou une tension exagérée de la courroie, ou un graissage défectueux. Quelquefois encore elle est due à des causes plus graves : arbre faussé, frottements anormaux, etc.

Régulation. — On arrive à régler les constantes du courant continu par divers moyens dont les principaux sont :

1° Action sur le moteur lui-même ; on règle l'admission de vapeur ou de gaz suivant les besoins. C'est un système peu parfait ;

2° Par les rhéostats ;

3° Dans certains cas exceptionnels, par un déplacement des balais.

De ces trois moyens, nous ne décrirons que le second qui consiste à introduire des résistances, soit dans le circuit d'utilisation, soit dans celui d'excitation.

Inutile de dire, avant de commencer, que les moyens n'ont pas leur raison d'être dans le cas de machines compound ou hypercompound qui se règlent automatiquement.

Les rhéostats permettent de régulariser, soit la tension, soit l'intensité.

En principe, ces deux modes de régulation reviennent à un seul ; il s'agit suivant le cas, d'introduire les résistances d'après les indications du voltmètre ou d'après celles de l'ampèremètre.

On emploie, pour ce réglage, des rhéostats, constitués par des fils de maillechort contournés en spirale et placés sur un support isolant. Toutes ces résistances se font suite et constituent deux rangées de spirales ordinairement (fig. 437). De deux en deux bobines se voient des fils reliés aux divers plots et

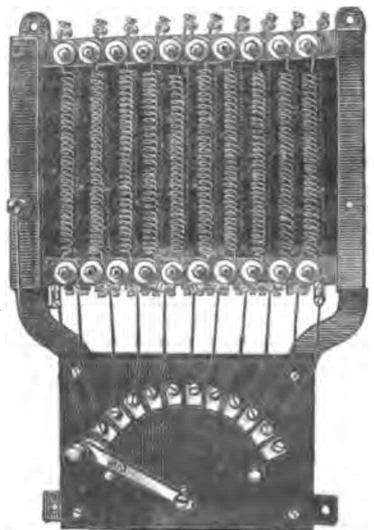


Fig. 437.

l'on intercale le rhéostat dans le circuit par deux bornes : l'une, qui se voit à gauche du dessin, communique avec le premier plot, l'autre est en connexion avec la manivelle. Selon que cette dernière repose sur l'une ou l'autre des touches, on introduit une résistance variable ; pour la position figurée, la résistance est nulle ; au contraire si la manette est poussée sur le dernier plot, le courant est interrompu.

C'est là un rhéostat à commutateur. Souvent l'ensemble des fils est enfermé dans une boîte de tôle perforée ce qui permet le refroidissement par circulation d'air.

Une autre forme réside dans le rhéostat à curseur : un fil de résistance est enroulé sur un tambour isolant ; un curseur, pouvant présenter un bon contact avec le conducteur, se déplace suivant une génératrice du cylindre et vient toucher le maillechort sur l'une quelconque des spires. Le circuit est relié, par ses extrémités, à l'origine de la grosse bobine, d'une part, et au curseur de l'autre ; les formes sont d'ailleurs variables.

Enfin, les résistances liquides sont aussi employées dans certains cas spéciaux :

1° C'est une auge à sulfate de sodium dans laquelle plonge un cylindre de plomb (la résistance liquide est prise entre le cylindre et les parois ; elle est variable suivant l'enfoncement du corps métallique dans la solution saline) ;

2° On prend aussi du carbonate de sodium avec deux lames de cuivre parallèles et maintenues à distance invariable ; elles constituent les extrémités du circuit et la résistance interposée dépend de la profondeur du système dans la solution ; en effet, la *section* de la couche liquide varie avec l'enfoncement des lames ;

3° Enfin, quelquefois ce sont deux lames parallèles toujours immergées, mais de distance variable. Elles sont les points aboutissants du circuit, de manière que la *longueur* liquide interposée dépende du déplacement imprimé.

Nous connaissons donc les appareils de régulation manœuvrés d'après les indications, soit du voltmètre, soit de l'ampèremètre.

Dans certains cas, on désire régler le courant d'une façon automatique. On emploie alors, soit des *régulateurs de tension*, soit des *régulateurs de courant.*

Les premiers se mettent en dérivation ordinairement, les seconds en série avec le courant utilisé Les résistances des appareils de réglage (les pièces essentielles sont des solénoïdes) dépendent, bien entendu, du système adopté ; pour régler une tension, par une dérivation, il faut une bobine résistante ; pour un régulateur de courant, au contraire, le fil doit être gros et court.

Les appareils sont nombreux ; nous nous contenterons d'en indiquer un seul.

Régulateur Thury. — Il s'agit de maintenir constante la différence de potentiel entre deux points (pris sur les bornes de la dynamo ordinairement). On les réunit par une bobine très résistante S, avec noyau de fer mobile, convenablement équilibré par un ressort *r*. A cette armature magnétique est articulé en O un levier qui se maintient exactement horizontal pour le voltage normal de la machine, c'est-à-dire pour le courant correspondant dans le solénoïde. Si ce courant vient à faiblir, l'armature obéit au



ressort et bute contre A. Au contraire, une augmentation de tension se traduit par une attraction plus grande du noyau. Le levier touche alors la pointe B; le contact de

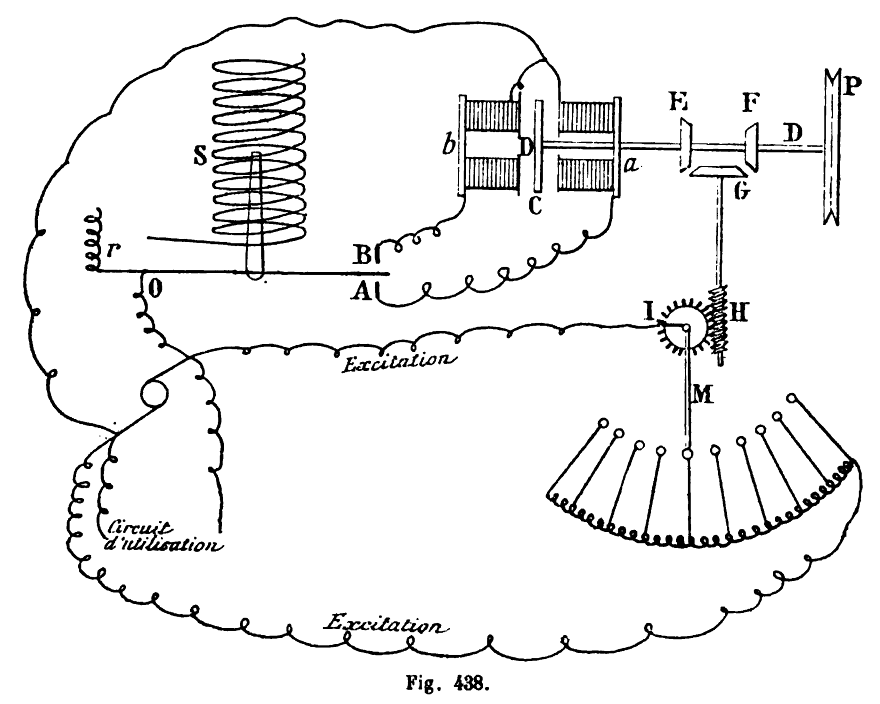


Fig. 438.

O et de A envoie le courant dans l'électro à culasse a; celui de la pièce mobile et de B, envoie une dérivation dans le deuxième électro b. Entre les deux doubles bobines, se trouve, en guise d'armature, un disque de fer C fixé à un arbre DD constamment entraîné par un moteur agissant sur la poulie à gorge P. Il reste à indiquer, pour terminer cette disposition : trois cônes de friction E, F, G; les deux premiers sont calés sur l'arbre; le troisième G peut être entraîné par E ou par F suivant que l'arbre se déplace longitudinalement d'un côté ou de l'autre. Le mouvement de la roue d'angle G se communique, par une vis sans fin H à un pignon I qui entraîne lui-même la manivelle M d'un rhéostat intercalé sur le circuit d'excitation.

On comprend le mécanisme de la régulation :

1° Si le potentiel est normal, le courant qui circule dans le solénoïde S a sa valeur moyenne et laisse le levier dans sa position de repos. Aucun courant ne passe ni dans a ni dans b; l'arbre DD reste en place; GH et M ne tournent pas;

2° Soit une diminution de tension; le courant S s'affaiblit; un passage d'électricité s'établit dans a, d'où un déplacement de C vers a, ce qui fait entraîner la manette du rhéostat commutateur par la roue E : la résistance se modifie jusqu'à rendre au voltage sa valeur normale;

3° Au contraire, si la tension augmente c'est F qui entraîne le pignon denté I et les résistances sont modifiées dans le sens contraire du précédent.

HUITIÈME PARTIE

COURANTS ALTERNATIFS
LEUR PRODUCTION INDUSTRIELLE

CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS SUR LES COURANTS ALTERNATIFS

Nous avons vu (page 215) un moyen d'obtenir des courants alternatifs. Ces courants étaient représentés par une *sinusoïde* d'où le nom de *sinusoïdaux* qui leur a été appliqué. Mais il faut savoir que, dans la pratique, la fonction périodique n'est pas toujours aussi simple. Il suffit en effet que l'on ait, d'une façon générale :

$$f(t) = f(t + T) = f(t + 2T) = \ldots$$

pour que la fonction $f(t)$ soit périodique. Le temps T est, comme l'on sait, la durée de la *période*.

Fréquence. — On nomme ainsi le *nombre de périodes par seconde*. En général, les fréquences adoptées dans la pratique varient de 40 à 140. La valeur 50, en particulier, est une des plus répandues.

Au lieu de considérer la *fréquence* n, on envisage souvent la pulsation ω

$$\omega = 2\pi n = \frac{2\pi}{T}$$

Représentation d'un courant sinusoïdal. — Nous aurons toujours en vue, dans la suite, les courants de cette nature dont on cherche à s'approcher autant que possible dans la pratique.

On a vu (page 216) que la valeur e de la f. é. m., à chaque instant, est donnée par la formule

$$e = \text{E} \sin 2\pi \frac{t}{\text{T}} = \text{E} \sin \omega t$$

E étant la valeur maxima de cette différence de potentiel et t l'époque considérée.

Prenons donc (fig. 439) une droite OA de longueur E et faisons-la tourner autour du

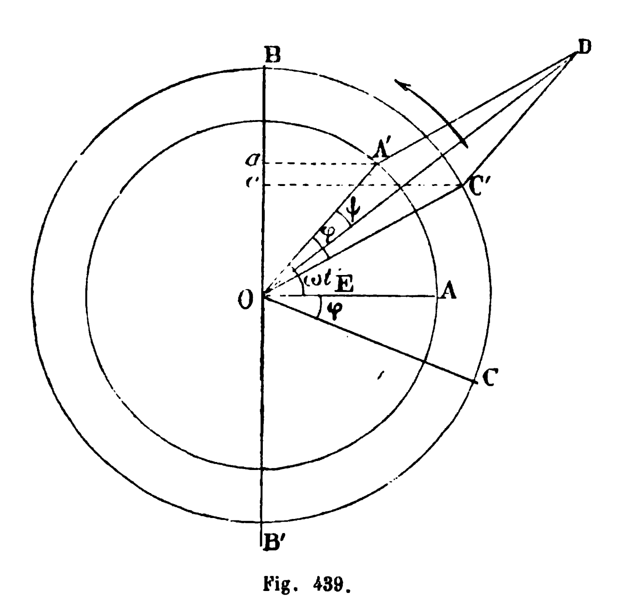


Fig. 439.

point O avec une vitesse angulaire ω, de manière qu'elle fasse un tour complet dans la durée d'une période T. A l'époque t, la droite a déjà parcouru l'angle ωt et elle occupe la position OA'. Sa projection Oa sur un axe BB' perpendiculaire à OA a pour valeur

$$\text{OA}' \sin \omega t = \text{E} \sin \omega t ;$$

elle donne donc, à chaque instant, la valeur de la f. é. m.

Nous opérons de la même façon si nous voulons représenter un autre courant sinusoïdal, de même période, mais présentant sur le premier un retard de phase, soit φ

$$e' = \text{E}' \sin (\omega t - \varphi).$$

La droite initiale est alors OC en arrière de OA d'un angle φ (OC = E') et, au temps t, nous avons OC' (en retard de φ sur OA') dont la projection Oc sur BB' est bien égale à e'.

Composition de deux courants sinusoïdaux. — Supposons que les deux



courants considérés circulent dans un même circuit; ils vont se composer pour donner un courant résultant que nous allons rechercher. Au temps t nous avons donc

$$e = E \sin \omega t$$
$$e' = E' \sin (\omega t - \varphi)$$

La f. é. m. résultante s'obtient, au même moment, en additionnant les deux valeurs partielles et l'on peut écrire

$$e_1 = e + e' = E \sin \omega t + E' \sin (\omega t - \varphi)$$

Développons et mettons en facteur $\sin \omega t$ et $\cos \omega t$, il vient

$$e_1 = \sin \omega t \, (E + E' \cos \varphi) - E' \cos \omega t \sin \varphi$$

expression qui peut être mise sous la forme

$$e_1 = E_1 \sin \omega t \cos \psi - E_1 \cos \omega t \sin \psi$$
$$= E_1 \sin (\omega t - \psi)$$

Il suffit, en effet, pour cela que

$$E + E' \cos \varphi = E_1 \cos \psi$$
$$E' \sin \varphi = E_1 \sin \psi$$

ce qui conduit à

$$E_1^2 = E^2 + E'^2 + 2EE' \cos \varphi$$
$$\operatorname{tg} \psi = \frac{E' \sin \varphi}{E + E' \cos \varphi}$$

On voit donc que :

1° Le courant résultant est sinusoïdal comme chacun des composants;

2° Il a la même période que chacun d'eux;

3° Il retarde sur le premier d'un angle ψ;

4° Le maximum de sa force électromotrice E_1 est égal à la diagonale d'un parallélogramme soit OD (fig. 439) construit sur les droites OA' et OC', égales à E et à E', qui représentent les deux maxima à un même instant;

5° L'angle A'OD, comme le montre l'expression de $\operatorname{tg}\psi$ est la différence de phase entre le courant résultant et celui que l'on a pris pour origine de phase, c'est-à-dire E.

6° Enfin la projection de OD sur OB donne, à chaque instant, la valeur de la f. é. m. résultante.

Influence de la self-induction sur les courants alternatifs. — Le problème a été traité page 218 et nous sommes arrivés à ce résultat que la self-induction a pour effet :

1° De diminuer la f. é. m. du courant;

2° De faire retarder le courant sur la f. é. m. La figure 225 (page 219) nous a montré en *oabc* le courant ainsi modifié, représenté par la fonction

$$i = \frac{E \cos \varphi}{R} \sin (\omega t - \varphi) \qquad (1)$$



formule dans laquelle :

E représente la f. é. m. principale,

R la résistance du conducteur,

φ la différence de phase, définie par $\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega L}{R}$, L étant le coefficient de self-induction du circuit.

L'expression de i peut, par développement, se mettre sous la forme

$$i = \frac{E \cos \varphi}{R} (\sin \omega t \cos \varphi - \cos \omega t \sin \varphi).$$

Or, de la valeur de $\operatorname{tg}\varphi$, nous tirons aisément

$$\sin \varphi = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

Il vient, par suite, si nous portons ces valeurs dans l'expression de i

$$i = \frac{E R}{R^2 + \omega^2 L^2} \sin \omega t - \frac{E \omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} \cos \omega t$$

$$(2) \qquad = \frac{E R}{R^2 + \omega^2 L^2} \sin \omega t + \frac{E \omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

Ainsi le *courant obtenu* peut être considéré comme *dû à la superposition de deux courants* :

Le premier est en *concordance* de phase avec la f. é. m. donnée : $E \sin \omega t$; on l'appelle *watté* ou *en phase* ;

Le second, en retard de $\frac{\pi}{2}$ ou de $\frac{1}{4}$ phase sur cette f. é. m. est dit *déwatté* ou *en quadrature*.

Au lieu de décomposer ainsi le *courant obtenu*, nous pouvons décomposer la *force électromotrice* résultante et la méthode géométrique indiquée va se prêter facilement à cette opération : portons sur une droite origine Ox (fig. 440) la valeur OA de la f. é. m. maxima due au champ ; nous savons que le *courant* retarde d'un angle φ, dont nous connaissons la valeur, sur OA et aussi que le maximum de la f. é. m. résultante est réduit à $E \cos \varphi$ ou $OA \cos \varphi$, soit OB. Dès lors nous pouvons dire que : la f. é. m. résultante (de maximum OB) est donnée par la composition de deux f. é. m. : OA ou E due au champ et $AB = E \sin \varphi$, due à la self-induction, *en retard* de $\frac{\pi}{2}$ sur le courant obtenu.

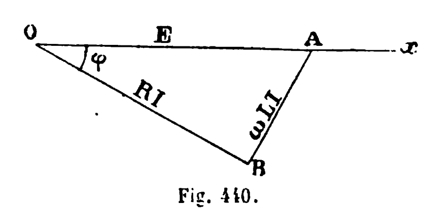


Fig. 440.

Ou encore :

La f. é. m. donnée E *est la résultante de la f. é. m. effective* $E \cos \varphi$, *en retard de* φ *sur* E, *et de* $\overline{B}A = E \sin \varphi$ *en avance de* $\frac{\pi}{2}$ *sur* OB.

D'après cela la construction géométrique destinée à nous faire connaître la valeur de la force électromotrice effective maxima est facile à comprendre : nous avons en effet à construire un triangle rectangle dont deux côtés sont donnés ; les côtés de l'angle droit sont respectivement $E \cos \varphi$ et $E \sin \varphi$. Or la formule (1) nous montre que l'intensité maxima obtenue est $I = \frac{E \cos \varphi}{R}$ d'où nous tirons

$$E \cos \varphi = R I$$

et de même

$$E \sin \varphi = E \cos \varphi \times \operatorname{tg} \varphi = \omega L I$$

La construction dès lors ne présente aucune difficulté.

Influence d'une capacité sur les courants alternatifs. — Nous avons dit déjà (page 220) qu'un condensateur intercalé dans le circuit traversé par des courants alternatifs n'arrête pas ces courants. Etudions maintenant d'un peu plus près son influence. Imaginons (fig. 441) deux points A et B entre lesquels nous maintenons une f. é. m. alternative

Fig. 441.

$$e = E \sin \omega t$$

et disposons sur le circuit AB :

1° D'abord un condensateur C entre les armatures duquel la différence de potentiel est V à un moment donné ;

2° Un conducteur CB supposé sans self-induction et de résistance R.

A un instant t, on a évidemment

$$e = E \sin \omega t = V + R I \qquad (1)$$

Au bout d'un temps dt, la tension a crû de

$$de = E\omega \cos \omega t \, dt = dV + R \, dI \qquad (2)$$

Appelons C la capacité du condensateur ; la quantité d'électricité en jeu dans cet accroissement de charge de l'instrument est $C \, dV$; elle est représentée d'autre part par un courant I de durée dt ; donc

$$C \, dV = I \, dt$$

L'expression (2) devient par suite

$$E \, \omega \cos \omega t \, dt = \frac{I}{C} dt + R \, dI$$



ou

$$E\,\omega \cos \omega t = \frac{I}{C} + R\frac{dI}{dt} \qquad (3)$$

Cette équation différentielle est semblable à celle de la page 218 et relative à l'influence de la self-induction; elle s'intègre de la même manière et donne

$$I = \frac{E \cos \varphi}{R} \sin(\omega t + \varphi)$$

avec φ défini par

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\omega C R}$$

Les effets de la capacité sont donc de :

1° *Réduire la f. é. m. maxima dans le rapport de 1 à cos* φ.

2° *Faire avancer le courant sur la force électromotrice de la quantité* φ.

Ces deux effets, comme on le voit aisément, sont d'autant plus marqués que la fréquence, la capacité et la résistance sont plus petites. La figure 442 indique en *abc* la nouvelle sinusoïde représentative.

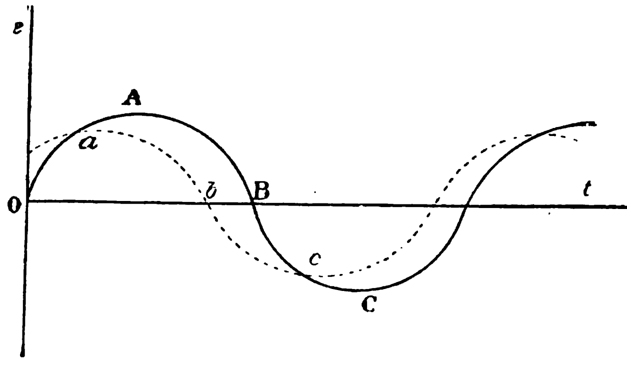


Fig. 442.

En répétant ici le raisonnement tenu précédemment à propos de la self-induction, on trouve que :

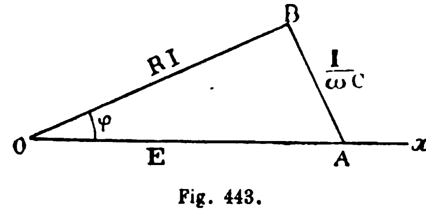


Fig. 443.

La f. é. m. effective OB = RI *est la résultante de celle qui est due au champ, soit* E *et d'une autre* AB (fig. 443) *soit* $\frac{I}{\omega C}$ *en avance de* $\frac{\pi}{2}$ *sur le courant obtenu.*

ou encore :

La f. é. m. donnée E *est la résultante de la f. é. m. effective* RI *ou* OB *en avance de* φ *sur* E, *et de* BA *ou* $\frac{I}{\omega C}$ *en retard de* $\frac{\pi}{2}$ *sur* RI.

La construction est donc très facile.

Coexistence d'une self-induction et d'une capacité. — Supposons la combinaison des deux dans le même circuit traversé par des courants alternatifs. La construction géométrique, indiquée dans les deux cas isolés, va immédiatement nous renseigner : soit R la résistance du conducteur; portons suivant OA (fig. 444) la valeur RI, produit de cette résistance par l'intensité maxima du courant, puis en AB (en avance de $\frac{\pi}{2}$ sur OA) portons une longueur ωLI représentant la f. é. m. de self-induction, et en AC (en retard de $\frac{\pi}{2}$ sur OA) une longueur $\frac{I}{\omega C}$. Ces deux dernières f. é. m. opposées nous donnent une résultante AD égale à AB — AC et nous obtenons finalement en OD la valeur de la f. é. m. due au champ et capable de produire le courant maximum I.

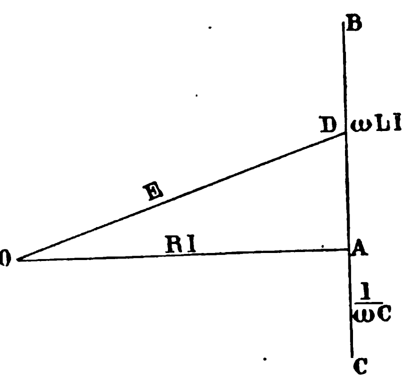


Fig. 444.

Remarque. — En général I est l'inconnue du problème et E est donné. Dans ce cas on construit les lignes OA, AB, AC pour une valeur unité de l'intensité, et l'on obtient OD correspondant à cette intensité; le rapport $\frac{E}{OD}$ nous donne alors l'intensité I.

Dans la figure 444, l'effet de la self-induction l'emporte sur celui de la capacité ; le cas opposé peut aussi se présenter. Enfin, on peut obtenir, si on le veut, une compensation parfaite des deux influences et il suffit pour cela que

$$\omega L I = \frac{I}{\omega C}$$

c'est-à-dire que

$$\omega^2 C L = 1$$

Ainsi pour corriger l'effet d'une self-induction L, il faut ajuster un condensateur de capacité C donnée par la formule

$$C = \frac{1}{\omega^2 L}$$

Cette *capacité* doit donc être d'autant plus *faible* que le *coefficient de self* est plus *fort*. De plus la compensation n'a lieu que pour une fréquence déterminée et si on modifie la période, on voit l'une des deux influences l'emporter sur l'autre.

Application numérique. — Soit un conducteur de self-induction égale à un *henry* ; quelle capacité faut-il employer pour neutraliser la première influence, pour une fréquence de 50 périodes à la seconde ?

De $n = 50$, nous tirons $\omega = 2\pi \times 50 = 314,16$
d'où

$$C = \frac{1}{314,16^2} \text{ farad}$$
$$= 10,132 \text{ microfarads}$$

Intensité moyenne d'un courant alternatif. — Nous savons que l'intensité du courant obtenu varie en fonction du temps ; il s'agit donc de représenter l'intensité par une valeur moyenne capable de nous renseigner sur la quantité d'électricité débitée par le courant. Nous nous supposerons placés dans le cas (qui est le plus ordinaire) où le conducteur présente de la self-induction mais pas de condensateur intercalé. Alors nous avons pour intensité à un moment t

$$i = \frac{E \cos \varphi}{R} \sin (\omega t - \varphi)$$

expression dans laquelle toutes les quantités nous sont connues. Représentons (fig. 445) la courbe des valeurs de i ; elle nous montre une ordonnée maxima, correspondant au

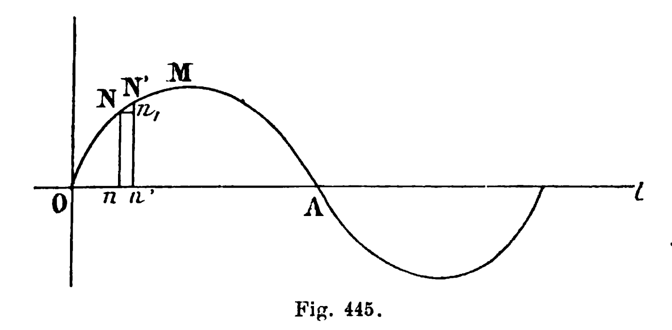


Fig. 445.

point M, et d'autant plus considérable que le coefficient de self est plus faible ; pour déterminer l'*intensité moyenne*, on calcule la quantité totale d'électricité qui s'écoule pendant une demi-période [1] et on la divise par la durée de cette demi-période $\frac{T}{2}$. Avec la courbe, cette opération est facile. Considérons, en effet l'époque marquée par le point n sur l'axe des temps ; alors l'intensité est Nn ; elle se maintient à peu près invariable si on considère un intervalle de temps nn' ou dt, infiniment petit, à partir de l'époque indiquée. Pendant cet intervalle la quantité d'électricité qui s'écoule est le produit de l'intensité Nn par le temps dt ; elle est représentée par l'aire du rectangle N$n_1 n'n$, soit approximativement par l'aire du trapèze curviligne Nnn'N'. Pendant la demi-période, la somme d'électricité en mouvement est l'aire limitée par la courbe OMA et l'horizontale OA. Cette quantité divisée par OA donne I_m. L'intensité moyenne est donc la hauteur du rectangle construit sur la base OA et équivalent à la surface OMA.

(1) Remarquons que nous prenons une demi-période et non une période entière de façon à n'admettre que des termes de même signe. Si nous étendions l'intégration à l'intervalle T, nous aurions une somme totale d'électricité nulle

Le calcul va nous donner facilement sa grandeur. Si nous appelons i l'intensité à un moment donné, nous devons effectuer, pour trouver I_m, le calcul

$$I_m = \frac{1}{\frac{T}{2}} \int_o^{\frac{T}{2}} i \, dt$$

Mais remarquons que la quantité d'électricité en mouvement ne dépend nullement du retard de phase introduit dans le sinus de l'arc ωt et nous pouvons écrire

$$I_m = \frac{2}{T} \frac{E \cos \varphi}{R} \int_o^{\frac{T}{2}} \sin \omega t \, dt$$

L'intégration est immédiate ; elle donne

$$I_m = -\frac{2 E \cos \varphi}{TR} \times \frac{1}{\omega} \left[\cos \omega t \right]_o^{\frac{T}{2}}$$

Pour $t = \frac{T}{2}$, $\cos \omega t = -1$; pour $t = 0$, le même cosinus vaut l'unité. On a donc en somme

$$I_m = \frac{E \cos \varphi}{R} \times \frac{2}{\pi}$$

Or, le premier facteur $\frac{E \cos \varphi}{R}$ est le maximum de l'intensité, soit I ; on peut donc écrire

$$I_m = I \times \frac{2}{\pi} = 0,636 \text{ I}$$

Intensité efficace. — Les courants alternatifs, en passant dans un conducteur, produisent de la chaleur comme le feraient les courants continus. Dans un intervalle de temps infiniment petit dt, le dégagement de chaleur est proportionnel à

$$i^2 \, dt$$

et pendant la période à

$$\int_o^T i^2 \, dt$$

On peut faire le calcul et diviser le résultat par la durée T de la période : on a alors le carré de l'intensité efficace

$$I_e^2 = \frac{1}{T} \int_o^T i^2 \, dt = \frac{1}{T} \int_o^T \frac{E^2 \cos^2 \varphi}{R^2} \sin^2 \omega t \, dt = \frac{E^2 \cos^2 \varphi}{R^2 T} \int_o^T \sin^2 \omega t \, dt$$

Or on sait que

$$\int_o^T \sin^2 \omega t\, dt = \int_o^T \cos^2 \omega t\, dt = \frac{1}{2}\left[\int_o^T \sin^2 \omega t\, dt + \int_o^T \cos^2 \omega t\, dt\right] = \frac{1}{2}\int_o^T dt = \frac{T}{2}$$

Dès lors

$$I_e^2 = \frac{E^2 \cos^2 \varphi}{R^2 T} \times \frac{T}{2} = \frac{E^2 \cos^2 \varphi}{2 R^2}$$

d'où l'on tire

$$I_e = \frac{E \cos \varphi}{R} \frac{\sqrt{2}}{2} = I \times \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707\ I$$

Cette intensité efficace est, d'après cette définition, celle qu'il faudrait donner à un courant continu pour obtenir même dégagement de chaleur dans le fil et par conséquent même incandescence. Elle se mesure directement par des ampèremètres spéciaux et aussi par les électro-dynamomètres. C'est la valeur la plus importante à considérer.

Comparons les deux intensités définies. Nous avons

$$\frac{I_m}{I_e} = \frac{0,636}{0,707} = 0,9 \text{ environ.}$$

Il faut donc, si l'on veut l'intensité moyenne, déduire $\frac{1}{10}$ de la valeur donnée par les appareils de mesure.

Impédance. — Nous savons que le *retard* et l'*avance* de phase dus respectivement à l'induction et à une capacité sont accompagnés d'une diminution de la force électromotrice. Mais, comme on l'a fait remarquer déjà (page 219), l'effet se traduit aussi bien par un accroissement de la résistance présentée au courant : de R à $\frac{R}{\cos \varphi}$. Il en résulte donc qu'un conducteur donné présente aux courants alternatifs une résistance différente de celle qu'il offre aux courants continus. Cette nouvelle valeur R′ s'appelle *résistance apparente* ou *impédance*. Pour exprimer R′, considérons les trois cas possibles suivants :

1° *Le circuit présente seulement de la self-induction.* Alors

$$\text{tg}\ \varphi = \frac{\omega L}{R}$$

d'où

$$R'^2 = \frac{R^2}{\cos^2 \varphi} = R^2 (1 + \text{tg}^2 \varphi) = R^2 + \omega^2 L^2$$

ou

$$R' = R \sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{R^2}}$$

Ainsi l'*impédance* R′ diffère d'autant plus de la *résistance ohmique* R que la self-induction et la fréquence sont plus considérables. Elle peut être considérée comme la résultante géométrique de deux résistances rectangulaires (fig. 446) : R, résistance ohmique et ω L appelée *réactance*. Quand, par suite de la faible valeur de L, la réactance est petite, l'impédance diffère peu de la résistance ohmique. On remarque encore, dans la construction ci-contre, que l'angle CBA est égal au retard de phase φ dû à la self-induction.

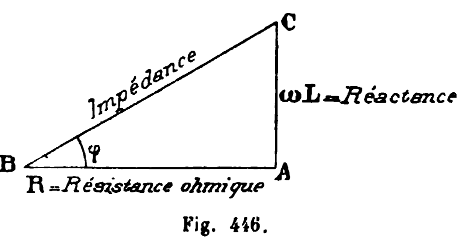


Fig. 446.

2° *Le circuit, supposé sans self-induction, est interrompu par un condensateur.* Appelons C la capacité intercalée; une avance de phase φ se produit, réglée par la formule

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\omega C R}$$

Dès lors on a

$$R'^2 = \frac{R^2}{\cos^2 \varphi} = R^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) = R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}$$

ou

$$R' = R \sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 C^2 R^2}}$$

La résistance apparente R' diffère donc, dans ce cas, d'autant plus de la résistance ohmique R que la fréquence et la capacité sont plus petites; elle peut être considérée ici encore comme la résultante géométrique de deux résistances rectangulaires : R (ohmique) et $\frac{1}{\omega C}$ que l'on appelle *capacitance*. La construction (fig. 447) qui donne

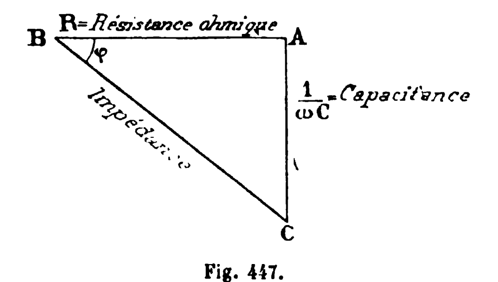


Fig. 447.

l'impédance se rapproche de celle de la figure 446; elle nous donne en CBA l'avance de phase du courant obtenu sur le f. é. m.

3° *Coexistence de la self-induction et d'une capacité.* La réactance et la capacitance sont alors en opposition, et la construction précédente nous donne facilement

(fig. 448) la valeur de l'impédance : nous portons en effet suivant BA la valeur de R, puis en AC la réactance ωL et en AC' la capacitance $\frac{1}{\omega C}$. Ces deux dernières résistances opposées donnent la résultante AD égale à $\omega L - \frac{1}{\omega C}$. On a donc

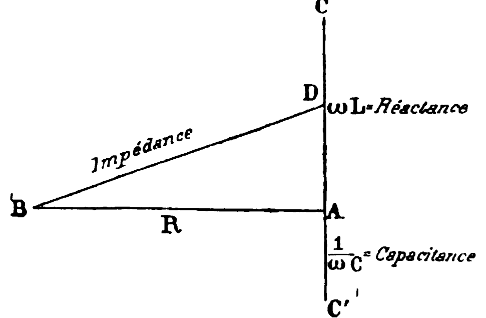


Fig. 448.

$$R'^2 = R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2$$

La valeur de l'impédance se réduit à celle de la résistance ohmique dans le cas déjà signalé (page 425) où

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

c'est-à-dire quand

$$C = \frac{1}{\omega^2 L}$$

Dans tous les autres cas, l'un des termes de la parenthèse prédomine et la valeur de R' est supérieure à celle de R.

Avant d'abandonner cette question de la résistance spéciale aux courants alternatifs, nous rappellerons cet accroissement anormal de la résistance indiqué page 230, et résultant de l'inégale répartition du courant alternatif dans toutes les portions d'un conducteur de forte section. Cette augmentation spéciale s'appelle *effet Kelvin*.

Force électromotrice efficace. — L'intensité efficace d'un courant alternatif étant connue I_e, nous appellerons *force électromotrice* efficace E_e le produit

$$E_e = R' \times I_e$$

En remplaçant R' par sa valeur $\frac{R}{\cos \varphi}$ nous obtenons

$$E_e = \frac{R I_e}{\cos \varphi}$$

ou encore, en remplaçant I_e par sa valeur trouvée page 428.

$$E_e = \frac{R}{\cos \varphi} \times \frac{E \cos \varphi}{R} \frac{\sqrt{2}}{2} = E \frac{\sqrt{2}}{2} = 0{,}707\ E$$

Cette valeur est donnée par les voltmètres spéciaux pour courants alternatifs.

Application des formules précédentes. — 1° Soit sur une distribution à 110

volts alternatifs (f. é. m. efficace) une dérivation de résistance ohmique égale à 1 ohm présentant un coefficient de self de $\frac{1}{10}$ henry. On cherche l'intensité efficace dans ce fil, sachant que la fréquence est de 50 périodes à la seconde.

De la formule

$$R' = R\sqrt{1 + \frac{\omega^2 L^2}{R^2}}$$

nous tirons

$$R' = \sqrt{1 + \frac{314,16^2}{10^2}} = 31,43$$

L'intensité efficace est donc

$$I_e = \frac{E_e}{R'} = \frac{110}{31,43} = 3,58 \text{ ampères.}$$

2° Sur la même distribution, nous branchons, au moyen de conducteurs de résistance négligeable, un condensateur de 1 microfarad. On demande l'intensité du courant.

De la formule

$$R' = R\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 C^2 R^2}} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$$

nous tirons pour $R = 0$

$$R' = \sqrt{\frac{1}{\omega^2 C^2}} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314,16 \times 0,000.001} = 3183$$

L'intensité efficace est donc

$$I_e = \frac{E_e}{R'} = \frac{110}{3183} = 0,0345 \text{ ampère}$$

3° Disposons maintenant nos deux appareils en série, nous avons

$$R' = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

$$= \sqrt{1 + \left(31,416 - \frac{1}{314,16 \times 0,000.001}\right)^2} = 3151,6$$

L'intensité efficace est donc

$$I_e = \frac{110}{3151,6} = 0,0349 \text{ ampère}$$

Puissance. — D'après la définition même de l'intensité efficace, on peut écrire que l'énergie disponible par seconde, ou la puissance, est

$$P = R I_e^2$$

R étant la résistance ohmique du conducteur. Or nous avons

$$E_e = R' I_e = \frac{R I_e}{\cos \varphi}$$

On en déduit

$$R I_e = E_e \cos \varphi$$

et si l'on porte cette valeur de $R I_e$ dans l'expression de P il vient

$$P = R I_e \times I_e = E_e I_e \cos \varphi$$

Donc, pour obtenir la puissance, il faut multiplier le produit $E_e I_e$ (qui représente la puissance d'un courant continu) par le facteur cos φ (cosinus du décalage entre le courant et la f. é. m.) appelé *facteur de puissance*. Ce coefficient dépend donc de la nature du circuit qui reçoit le courant. Il s'ensuit que l'on ne pourra pas indiquer, dans les alternateurs, la puissance effective, comme dans les dynamos, par un nombre de watts. On se borne généralement à donner le produit du voltage aux bornes par le débit en ampères. Ainsi, par exemple, s'il s'agit d'une machine capable de donner 100 ampères sous 3.000 volts, on indique

$$100 \times 3000 = 300.000 \text{ volts-ampères}$$
$$= 300 \text{ kilovolts-ampères.}$$

Si la machine travaille sur un circuit dénué de self-induction, $\cos \varphi = 1$, et l'on a

$$P = 300 \text{ kilowatts}$$

Dans le cas où le facteur de puissance est de 0,7, la puissance tombe à

$$P = 300 \times 0,7 = 210 \text{ kilowatts.}$$

Nous remarquerons dès maintenant qu'un circuit de lampes à incandescence est à peu près dénué de self, d'où un facteur de puissance presque égal à 1 ; au contraire des moteurs électriques, des lampes à arc, etc, composés d'électros donnent à cos φ une valeur plus ou moins réduite.

Les électros en particulier ont un coefficient L variable avec l'enfoncement du noyau dans la bobine. Si on les place sur le circuit du courant alternatif, ils peuvent donc régler le débit, comme les rhéostats des courants continus. On les nomme alors *bobines de self* ou de *réaction* et ils ont cet avantage de n'absorber qu'une énergie minime. Cette consommation est même réduite à zéro si le courant est décalé de $\frac{\pi}{2}$ car alors $\cos \varphi = 0$.



CHAPITRE II

COURANTS POLYPHASES

Définitions. — Considérons plusieurs circuits traversés par des courants alternatifs de *même période*. S'ils passent tous en même temps par leur valeur maxima, ils ont *même phase*. Mais si les maxima de l'un ne coïncident pas avec ceux des autres courants, on dit que les courants sont *décalés* ou *déphasés*.

On peut faire diverses combinaisons de tels courants présentant l'un sur l'autre une certaine différence de phase égale à une fraction donnée de la période. Les deux systèmes les plus employés sont les suivants :

1° On a deux courants de même période et de même force électromotrice; le deuxième retarde sur le premier d'un quart de phase (quand le premier arrive à son maximum

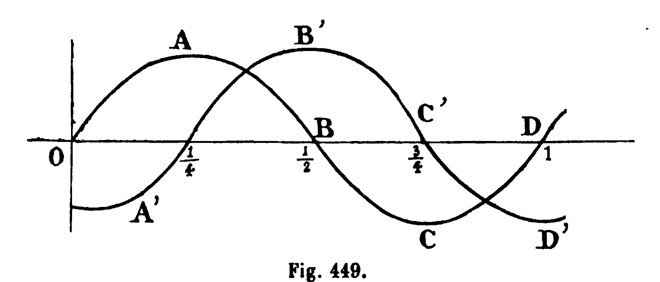


Fig. 449.

de force électromotrice, l'autre passe par sa valeur nulle, etc.). Ils sont représentés par les deux courbes OABCD et A'B'C'D'; on les appelle *courants diphasés* (fig. 449).

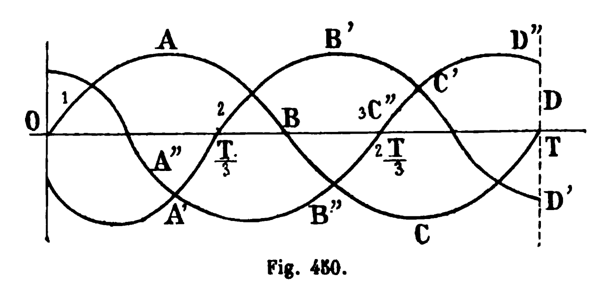


Fig. 450.

2° Soient trois courants 1, 2, 3 décalés : le n° 2 d'un tiers de période sur le n° 1

et le troisième d'un tiers de période sur le second. Ils sont représentés par les trois courbes (fig. 450) et on les appelle *courants triphasés.*

D'une manière générale, ces deux espèces de courants portent le nom de *courants polyphasés* ou de *courants à plusieurs phases.*

Propriété fondamentale. — Soient d'une manière générale, sur un anneau Gramme, n bobines semblables disposées régulièrement et tournant dans un champ uniforme avec une vitesse angulaire ω. A un moment donné t, la f. é. m. développée dans une première bobine étant

$$e_1 = \mathrm{E} \sin \omega t,$$

celle qui prendra naissance dans la suivante (distante d'un angle $\frac{2\pi}{n}$ de la première) sera

$$e_2 = \mathrm{E} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{n}\right)$$

dans la troisième

$$e_3 = \mathrm{E} \sin \left(\omega t - 2 \times \frac{2\pi}{n}\right)$$

et dans la n^e^ ou dernière

$$e_n = \mathrm{E} \sin \left[\omega t - (n-1) \frac{2\pi}{n}\right]$$

A cet instant, la somme des f. é. m. engendrées dans ces bobines en série est

$$e_1 + e_2 + \ldots . e_n = \mathrm{E} \left\{ \sin \omega t + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{n}\right) + \sin \left[\omega t - \left(2 \times \frac{2\pi}{n}\right)\right] + \ldots \right\}$$

Or la trigonométrie nous dit que la somme entre parenthèses est nulle; donc

$$e_1 + e_2 + e_3 + \ldots + e_n = 0$$

Ainsi, à un moment donné, la somme des f. é. m. développées dans l'anneau est nulle, fait que nous avons déjà indiqué.

Supposons maintenant qu'au moyen de bagues isolées, nous recueillions les n courants induits dans des circuits semblables, de même impédance R. L'intensité du courant obtenu dans le premier circuit est

$$i_1 = \frac{e_1}{\mathrm{R}} \sin (\omega t - \varphi)$$

φ étant le décalage. Il en est de même pour i_2 etc., et l'on trouve encore comme précédemment

$$i_1 + i_2 + i_3 + \ldots + i_n = 0$$

Dès lors supposons que nous employions n fils pour mener les n courants de la ma-



chine Gramme à un point d'utilisation. On pourrait donner à ces n courants un fil de retour commun et ce conducteur ne serait traversé par aucun courant. Dans ces conditions il est même possible de supprimer ce conducteur dont le rôle est nul.

Production des champs tournants par les courants polyphasés. — 1° Considérons d'abord des courants diphasés. Soient quatre bobines A, B, C et D à noyaux de fer disposées comme l'indique la figure 451. Les deux opposées A et C sont enroulées dans le même sens et il en est de même de B et de D.

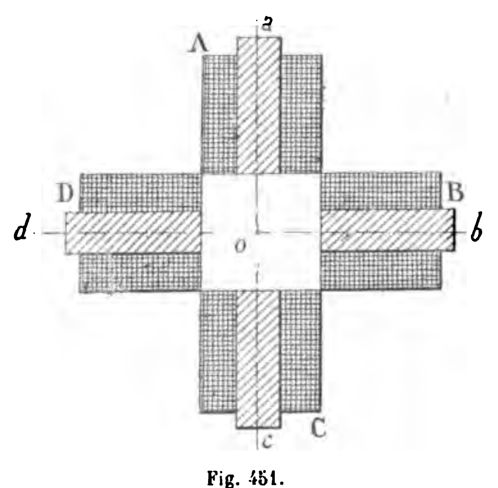


Fig. 451.

Le passage du courant dans les deux parties A et C engendre un champ magnétique de direction ac. En effet, l'une des bobines n'est que la continuation de l'autre. Mais *l'intensité de ce champ* est variable avec le temps ; soit (fig. 452) la courbe représentative du courant ; le champ subit les mêmes fluctuations que les ordonnées de OABCD en vertu de la formule

$$F = 1{,}25 \frac{NI}{l}.$$

Au temps zéro, l'intensité est nulle ; elle atteint son maximum après un temps $\frac{T}{4}$ et est alors dirigée dans le sens $0a$ par exemple (fig. 451) ; quand $t = \frac{T}{2}$, le champ est de nouveau annulé, puis il se renverse ensuite (sens oc), croît pour atteindre sa plus grande valeur après trois quarts de période, et ainsi de suite.

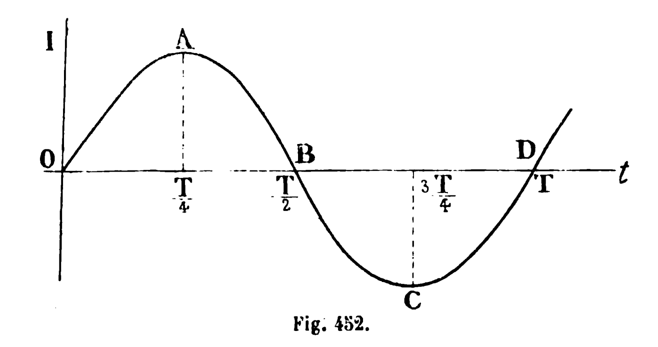


Fig. 452.

Donc, en résumé, le passage d'un courant alternatif dans les deux bobines A et C engendre un champ de *direction constante ac,* mais de grandeur et de signe (et par suite de sens) variables avec l'intensité du courant ; c'est dire que cette force f peut

s'exprimer en fonction du temps par

$$f = F \sin \omega t$$

F étant le maximum de l'intensité du champ (correspondant aux maxima du courant).

Le passage dans B et D d'un autre courant alternatif produit un autre champ de direction *bd*, mais variable comme le premier. Supposons à ce deuxième courant un retard d'un quart de phase sur l'autre ; il est représenté par la courbe A' B' C' D' et

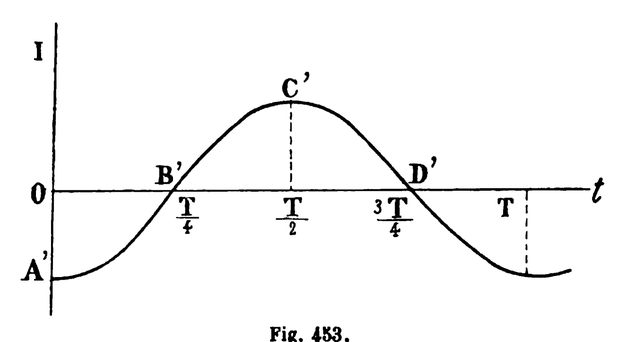


Fig. 453.

l'intensité du champ par lui créé retarde de $\frac{T}{4}$ sur l'intensité que l'on aurait si les deux courants étaient en concordance de phase.

Nous pouvons donc écrire

$$f' = F \sin \omega \left(t - \frac{T}{4}\right)$$
$$= F \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

F étant encore la force maxima, la même avec les deux courants identiques.

Ainsi, si nous prenons un point quelconque soumis à la fois aux deux champs, nous le voyons sollicité par deux forces f et f', qui sont rectangulaires. Ces deux actions se composent suivant la règle du parallélogramme des forces et nous avons, pour la valeur résultante : R, telle que

$$R^2 = f^2 + f'^2$$

Effectuons

$$R^2 = F^2 \sin^2 \omega t + F^2 \sin^2 \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$R^2 = F^2 \left[\sin^2 \omega t + \sin^2 \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)\right]$$

Or $\sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$ est, au signe près, égal à $\cos \omega t$.

On a dès lors

$$R^2 = F^2 (\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t)$$
$$= F^2$$

Ainsi l'intensité résultante R est à chaque instant égale à F ; *elle est constante.*

Il s'agit maintenant de chercher la direction et le sens de R. Nous avons vu qu'à un moment donné t, les valeurs des deux composantes du champ sont respectivement : suivant Oa (fig. 451)

$$f = F \sin \omega t$$

et suivant Ob

$$f' = - F \cos \omega t$$

La résultante R fait donc avec l'axe Ob un angle α tel que

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{f}{f'} = - \frac{F \sin \omega t}{F \cos \omega t} = - \operatorname{tg} \omega t ;$$

d'où nous tirons

$$\alpha = \pi - \omega t$$

Fig. 454.

Cette force R est donc dirigée suivant OR (fig. 454); elle est appliquée sur Od au temps zéro puis tourne avec la vitesse angulaire ω dans le sens $d\,a\,b$, de sorte qu'elle effectue un tour complet pendant la durée d'une période T.

On a donc un *champ tournant* engendré par les courants diphasés; son intensité est invariable et si on dispose, dans ce champ, un conducteur métallique mobile, on voit la pièce suivre les lignes de force : on a constitué un *moteur à champ tournant.*

2° Soient maintenant trois bobines A, B et C alimentées par des courants triphasés.

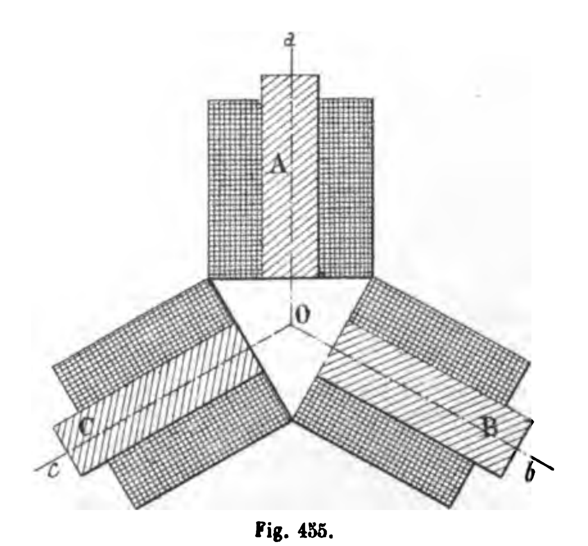


Fig. 455.

Elles sont mises à 120 degrés l'une de l'autre et produisent chacune un champ de

direction Oa pour la première, Ob et Oc pour les deux autres. Les intensités de ces champs sont données par les formules

$$f_a = \mathrm{F} \sin \omega t$$
$$f_b = \mathrm{F} \sin \omega \left(t - \frac{\mathrm{T}}{3}\right)$$
$$f_c = \mathrm{F} \sin \omega \left(t - \frac{2\mathrm{T}}{3}\right)$$

On peut chercher la résultante de ces trois forces concourantes, en un point commun aux trois champs.

Pour cela projetons nos trois composantes sur deux axes Oy passant par Oa et Ox perpendiculaire au premier. Nous obtenons

$$\mathrm{X} = f_b \cos x\mathrm{O}b + f_c \cos x\mathrm{O}c$$
$$\mathrm{Y} = f_a + f_c \cos y\mathrm{O}c + f_b \cos y\mathrm{O}b.$$

Remplaçons f_a, f_b, f_c, par leurs valeurs, en développant les sinus et portons aussi les valeurs des cosinus $x\mathrm{O}b$ etc. ; nous obtenons finalement

$$\mathrm{X} = -\frac{3\,\mathrm{F}}{2} \cos \omega t$$
$$\mathrm{Y} = \frac{3\,\mathrm{F}}{2} \sin \omega t.$$

On en déduit la résultante R qui a pour valeur

$$\mathrm{R} = \frac{3\,\mathrm{F}}{2}$$

Elle est donc indépendante du temps.

Quant à sa direction, elle fait avec l'axe Ox un angle α défini par

Fig. 456.

$$\mathrm{tg}\, \alpha = \frac{\mathrm{Y}}{\mathrm{X}} = -\mathrm{tg}\, \omega t$$

d'où $\alpha = \pi - \omega t$.

Cette force tourne donc dans le sens de la flèche avec une vitesse ω égale à la pulsation des courants employés.

En vertu de cette propriété particulière, les courants polyphasés sont très employés pour les transports d'énergie. Ils présentent d'autre part des avantages sur les courants alternatifs ordinaires ou monophasés au point de vue de leur production.

Production des courants polyphasés au moyen des dynamos. — Considérons une machine dont les inducteurs sont alimentés d'un courant continu; une spire est le siège d'un courant alternatif dont la période égale la durée d'une révolution complète.



Chaque spire se trouve dans le même cas, mais tous ces courants n'ont pas la même phase. En effet, si nous considérons 1 et 2, il existe une différence d'un quart de phase entre leurs deux courants et il en est de même encore quand nous remplaçons les deux tours de fil par deux bobines occupant les positions indiquées. On peut alors

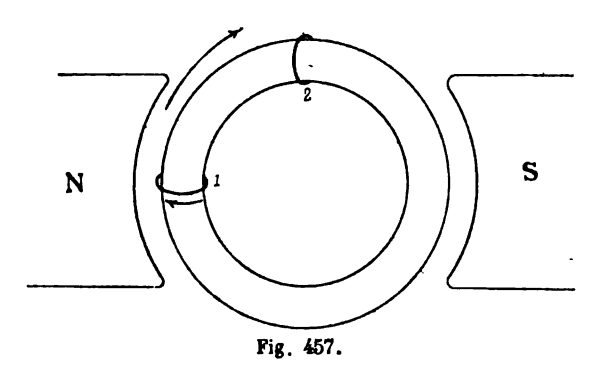


Fig. 457.

relier les extrémités de chacun de ces circuits à deux bagues isolées sur l'arbre et on recueille, au moyen de quatre frotteurs, deux courants alternatifs décalés l'un sur l'autre d'un quart de période; ce sont des courants *diphasés*.

Au lieu de prendre deux bobines à 90 degrés l'une de l'autre, nous pouvons en choisir trois équidistantes sur l'anneau. Chacune est le siège de courants alternatifs et la différence de phase existant entre deux courants voisins égale un tiers de période. Nous avons des courants *triphasés*.

Si l'on veut pratiquement *faire servir une dynamo bipolaire* à la production des courants polyphasés, on partage l'anneau en plusieurs segments :

1° Pour les courants *diphasés* on fait quatre parts égales et on relie les entresections marquées I, II, III et IV respectivement aux quatre bagues 1, 2, 3 et 4 isolées sur l'axe (fig. 458).

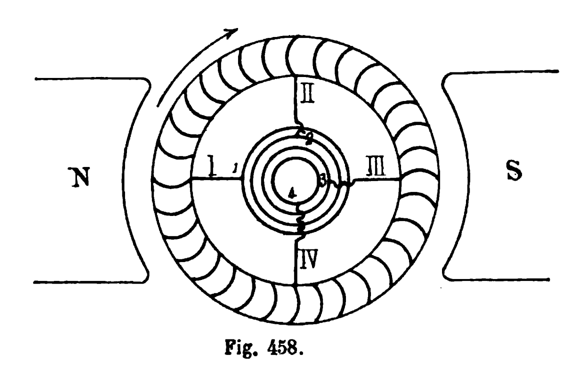


Fig. 458.

Les courants sont recueillis au moyen de quatre balais. Les deux frotteurs qui touchent 1 et 3 sont reliés par un premier circuit ; ceux qui appuient sur 2 et 4 forment les extrémités d'un second.

Actuellement (position de la fig. 458) la différence de potentiel entre 2 et 4 est

maxima ; dans un quart de tour, II sera devant S et IV prendra la position de I devant le pôle Nord ; la différence de potentiel sera réduite à zéro. Cette tension redeviendra maxima mais contraire après un deuxième quart de tour, et ainsi de suite.

Le courant puisé entre les balais 1 et 3 sera semblable et présentera toujours sur le premier une différence d'un quart de phase.

Nous aurons donc bien des courants diphasés, et il faudra quatre conducteurs pour les amener au point d'utilisation de l'électricité ;

2° L'obtention des courants *triphasés* est plus simple encore : on fait trois prises équidistantes I, II et III sur le pourtour de l'anneau ; chacune communique avec une bague isolée. On voit que les trois courants sont triphasés, d'après les retards qu'ils présentent. Pour les transporter, trois fils suffisent ; entre deux de ces conducteurs nous avons un courant alternatif ou encore ce qu'on appelle *une phase*.

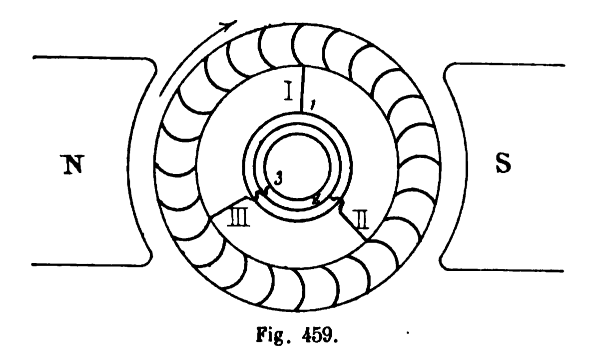


Fig. 459.

Il est inutile de faire remarquer que le collecteur ordinaire ne joue plus ici aucun rôle. On peut soulever les balais, mais il faut assurer l'excitation de la machine au moyen d'un courant continu fourni par une source étrangère et envoyé dans les inducteurs.

La fréquence des courants obtenus égale le nombre des tours effectués par l'induit en une seconde. La force électromotrice sur chaque phase se calcule comme dans le cas d'une dynamo ordinaire : nous pouvons déterminer celle qui correspond à une spire et nous savons qu'il y a le tiers des spires intéressées à la tension, d'où le moyen de connaître théoriquement la différence de potentiel sur chaque phase, en négligeant la self-induction.

Groupement des courants polyphasés. — 1° *Courants diphasés.* Nous avons dit que les deux courants *diphasés* exigent, pour leur transmission *quatre* conducteurs. Ce nombre de fils peut, *dans certains cas*, être réduit à *trois*. Il suffit pour cela de donner aux deux circuits, sièges des courants décalés de 90°, un point commun et de relier par trois fils les extrémités libres et le point commun au lieu d'utilisation. Il est à remarquer d'ailleurs que cette réduction est impossible avec la disposition de la figure 458. En effet, la réunion de deux points quelconques aurait pour résultat la mise en court-circuit d'une portion de l'anneau.

2° *Courants triphasés*. — Etant donnés trois circuits sièges de courants alternatifs triphasés, il y a deux manières de les grouper :

1° On peut réunir ces trois circuits en tension, fermer l'ensemble en court-circuit (fig. 460).

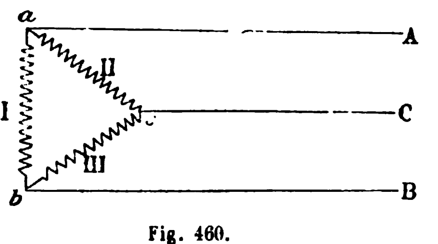


Fig. 460.

Les trois points de jonction a, b et c sont les extrémités d'une ligne à trois fils et l'on a entre deux fils quelconques une différence de potentiel alternative égale à celle qui est produite dans chacune des sections. Ce montage, en raison de sa disposition même, est dit *en triangle*. C'est celui qui a été adopté pour la machine de Gramme disposée pour courants triphasés (page 440).

2° On peut donner un point commun O aux trois circuits et faire partir la ligne à trois fils des extrémités a, b et c des trois circuits. C'est alors le *montage en étoile* (fig. 461). Dans ce cas, la différence de potententiel qui existe entre les divers fils n'est pas évidemment celle que l'on mesure sur chaque circuit ; il convient donc de calculer cette *tension étoilée*. Pour cela nous remarquons qu'entre A et B par exemple se trouvent mises en tension deux f. é. m., décalées de 120° l'une par rapport à l'autre. Nous prendrons donc le mode de représentation déjà employé : soit $Oa = E$ (fig. 462) la f. é. m. maxima développée dans un des circuits ; $Ob = E$ est en avance de 120° sur la première et nous avons pour résultante ab ; on calcule aisément ab : cette ligne a pour longueur

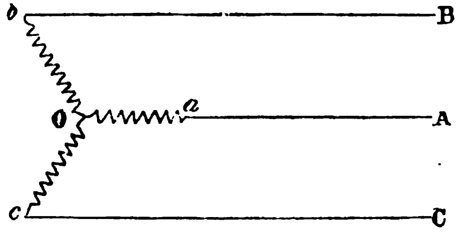


Fig. 461.

$$ab = Oa\sqrt{3}$$

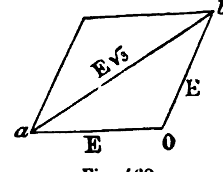


Fig. 462.

La tension étoilée vaut donc la tension sur chaque circuit multipliée par le facteur $\sqrt{3} = 1,732$.

CHAPITRE III

MESURES RELATIVES AUX COURANTS ALTERNATIFS

En plus des mesures correspondant à celles qui sont relatives aux courants continus, il y a lieu de déterminer la fréquence, la phase, etc., dans le cas particulier des courants alternatifs.

Mesure des intensités. — On peut classer en quatre catégories les instruments propres à mesurer les intensités efficaces des courants alternatifs :

1° *Les électrodynamomètres.* La balance de Thomson est utilisable mais, quand il s'agit de grandes intensités à évaluer, on remplace les conducteurs massifs par des bobines de fils isolés séparément et enroulés en parallèle (cela pour éviter les courants de Foucault). Tout autre électrodynamomètre, au préalable étalonné par comparaison avec le précédent, peut également être employé et le mode opératoire diffère peu alors de celui que nous connaissons.

2° *Ampèremètres à fer doux mobile.* Ces instruments donnent une déviation de sens invariable sous l'influence des courants alternatifs mais la fréquence exerce cependant sur la grandeur de cette déviation une influence considérable ; il faut donc étalonner l'appareil pour chaque fréquence particulière ou le faire servir uniquement à la mesure de courants de période donnée. Nous citerons parmi les types de cette classe l'appareil d'*Evershed*, décrit page 261 et celui de *M. Javaux*. Ce dernier (fig. 463) est constitué essentiellement par une bobine dans laquelle deux pièces de fer doux *a* et *b* fixes s'aimantent par le passage du courant ; une troisième pièce de fer *cc*, mobile autour de l'axe O, est maintenue, en l'absence de tout courant, contre *a* et *b*, par le poids de l'index *d* convenablement chargé. Dès que le courant passe, la palette *cc* est chassée et prend, sous l'action des deux forces combinées : magné-

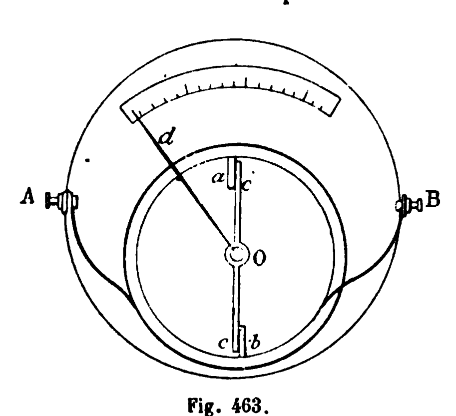


Fig. 463.

tisme et pesanteur, une position déterminée indiquée par l'index *d*. L'absence de ressorts antagonistes donne à ces instruments une grande constance.

3° *Ampèremètres à induction.* — Prenons comme exemple des appareils de cette catégorie, réservés spécialement aux mesures de courants alternatifs, le type de l'*Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft* (AEG) de Berlin. Il consiste essentiellement en un électro-aimant lamellé (fig. 464) alimenté du courant mesuré. Dans l'entrefer de cet électro, nous voyons : 1° un disque léger CD en cuivre ou en aluminium, mobile et solidaire de l'aiguille; 2° deux lames PP fixées aux branches de fer et parallèles au plateau. On remarque la dissymétrie de ces dernières pièces et on comprend alors que les courants de Foucault développés d'une part dans la partie découverte du disque et, d'autre part, dans P s'attirent mutuellement et provoquent un déplacement de CD dans le sens DP. Un ressort antagoniste donne à la déviation une grandeur en rapport avec l'intensité du courant étudié. Un aimant permanent, embrassant le disque entre ses deux branches, assure l'apériodicité.

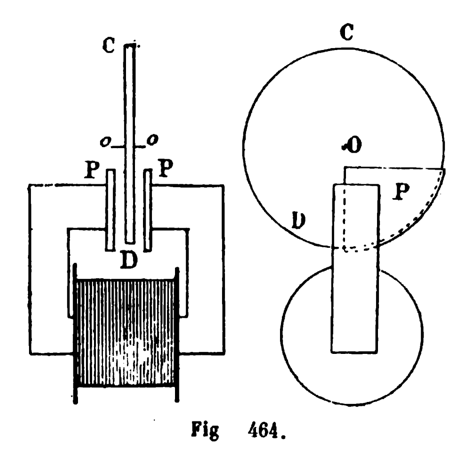


Fig 464.

Ici encore l'étalonnage dépend de la fréquence du courant.

A cet appareil se trouve souvent adjoint un petit transformateur spécial et cela dans des buts différents :

1° Si le courant étudié est de *haute tension*;

2° S'il est *très intense*. Alors il est inutile de faire passer par le tableau de distribution les conducteurs de grande section; on intercale sur la ligne le primaire du transformateur, et le circuit de l'ampèremètre est fermé, par un fil plus fin, sur le secondaire;

3° De la même manière, cet instrument de mesure peut alors être utilisé pour plusieurs courants distincts.

4° *Appareils à fil chaud.* — Nous avons déjà décrit (page 269) l'ampèremètre *Hartmann et Braun* qui peut servir aussi bien pour les courants alternatifs que pour les courants continus.

Mesure des forces électromotrices. — Plusieurs groupes d'instruments doivent encore être distingués.

1° *Les voltmètres électrostatiques.* — Nous connaissons déjà les types Kelvin (voir page 282). On a imaginé un certain nombre d'autres appareils basés sur des principes semblables. Ces instruments sont très bons quand la fréquence est peu considérable.

2° *Voltmètres à fer doux.* — Les systèmes que nous avons examinés pour ampère-

mètres (Evershed et Javaux) conviennent parfaitement, mais nous remarquerons encore qu'ils doivent être utilisés seulement dans le cas des fréquences moyennes. Si la période devenait très courte, il y aurait lieu de craindre les effets de self-induction. On comprend aussi que l'étalonnage doit être fait pour une fréquence donnée, car la graduation varierait si on modifiait ce facteur.

3° *Voltmètres à induction.* — L'ampèremètre AEG convenablement modifié constitue un voltmètre.

4° *Voltmètres thermiques.* — Le principe de ces instruments nous est connu. Ces voltmètres présentent une apériodicité complète étant donné que le fil atteint sans la dépasser, la longueur correspondant à la température obtenue.

Mesure des puissances. — Les wattmètres employés de préférence dans les cas des courants alternatifs, sont analogues à ceux que nous avons examinés au sujet des courants continus. Il est bon cependant de remarquer que la résistance additionnelle, placée sur le circuit dérivé, doit être autant que possible dénuée de self-induction. En effet la *réactance* que ce circuit présente amène, comme nous le savons, un décalage en arrière sur la f. é. m. d'où résulte un écart entre la puissance *indiquée* et la puissance *réelle*. Il s'agit en même temps de réduire autant que possible la réactance des enroulements du wattmètre lui-même et pour cela on diminue ordinairement le nombre des spires; mais on doit alors compenser cette faible valeur du nombre des tours par une intensité plus considérable dans le fil dérivé.

Lorsqu'on a affaire au cas particulier des courants triphasés, l'emploi du wattmètre peut présenter une complication : il s'agit en effet d'obtenir la puissance généralement avec un seul instrument convenablement branché. Considérons successivement les deux dispositions *en triangle* et *en étoile*.

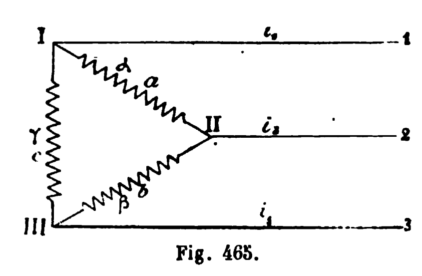


Fig. 465.

1° *Disposition en triangle.* — Appelons $\alpha\beta\gamma$ les différences de potentiel créées respectivement sur chacun des bras I-II, etc., et $a\ b\ c$ les intensités des courants circulant dans ces fils. La puissance totale utilisée est

$$P = a\alpha + b\beta + c\gamma$$

Mais nous savons qu'entre les trois forces électromotrices α, β et γ règne la relation

$$\alpha + \beta + \gamma = o$$

d'où nous tirons

$$\alpha = -(\beta + \gamma)$$

Portant cette valeur de α dans l'expression de P, nous obtenons

$$P = -a(\beta + \gamma) + b\beta + c\gamma$$

ou encore

$$P = \beta (b - a) + \gamma (c - a)$$

Mais nous remarquons qu'en appliquant la première loi de Kirchoff à chacun des points II et I, et en appelant i_1, i_2 et i_3 les intensités des courants circulant à chaque instant dans les trois fils de la distribution, on obtient

$$b - a = i_2$$
$$c - a = i_1$$

Finalement nous avons donc

$$P = i_2 \beta + i_1 \gamma$$

β et γ sont respectivement les différences de potentiel qui existent entre les fils 2 et 3 d'une part et 1 et 3 de l'autre. La puissance totale est donc la somme de deux puissances : celles qu'indiqueraient deux wattmètres dont les fils en série seraient branchés sur les fils 1 et 2 et les enroulements dérivés respectivement entre ces mêmes fils et le troisième conducteur.

2° *Montage en étoile.* — Nous avons encore

$$P = a\alpha + b\beta + c\gamma$$

La loi de Kirchoff nous donne

$$a + b + c = o$$

d'où

$$c = -(a + b)$$

Dès lors on a

$$P = a\alpha + b\beta - \gamma (a + b)$$

ou

$$P = a (\alpha - \gamma) + b (\beta - \gamma)$$

Mais si nous appelons V_1, V_2, V_3 les potentiels respectifs des trois points de départ des conducteurs et V celui du *point neutre*, nous avons

$$\alpha = V - V_1$$
$$\beta = V - V_2$$
$$\gamma = V - V_3$$

d'où

$$\alpha - \gamma = V_3 - V_1$$
$$\beta - \gamma = V_3 - V_2$$

Il vient donc finalement

$$\begin{aligned} P &= a (V_3 - V_1) + b (V_3 - V_2) \\ &= i_1 (V_3 - V_1) + i_2 (V_3 - V_2) \end{aligned}$$

expression identique à celle que nous avons trouvée dans le cas du montage en triangle.

Nous pouvons donc, avec un seul wattmètre *ordinaire*, que nous ferons passer par un *combinateur* spécial, d'une phase sur une autre, déterminer la puissance totale. Certains instruments, celui de *J. Richard* par exemple, sont d'ailleurs combinés pour donner par une seule lecture, et sans changement de connexions, la puissance cherchée. Dans ce modèle, la bobine fixe est partagée en deux tronçons insérés chacune sur un des fils 1 et 2. La partie mobile comprend aussi deux parties dérivées entre les mêmes fils 1 et 2 d'une part et le troisième fil commun 3 d'autre part. L'appareil totalise donc les deux puissances partielles pour donner P.

Compteurs d'énergie — Les appareils indiqués pour courant continu s'appliquent ordinairement, avec quelques modifications, à la mesure de l'énergie électrique sous la forme alternative.

Ces mêmes compteurs peuvent avoir leurs connexions disposées de manière à ce qu'ils servent dans le cas des courants triphasés.

Phasemètres. — Parmi les instruments spéciaux pour courants alternatifs, on signalera seulement les *phasemètres* dont le but est de déterminer le *facteur de puissance cos* φ des circuits. Cette mesure est surtout importante à effectuer dans le cas du couplage en parallèle de plusieurs alternateurs, comme nous le verrons plus tard au sujet de la distribution.

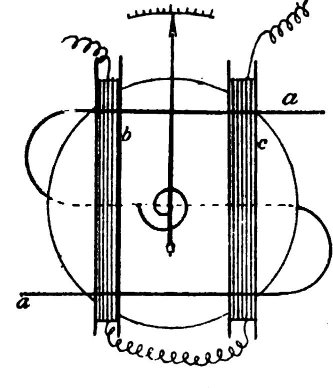


Fig. 466.

Nous prendrons un seul type, celui de la maison *Siemens et Halske* de Berlin : un disque de tôle mince est mobile autour d'un axe et entraîne avec lui une aiguille indicatrice. Cette partie est placée dans un champ tournant constitué de la manière suivante :

1° Une première bobine à gros conducteur *a* insérée dans le circuit ; elle reçoit donc le courant principal, lequel retarde de φ sur la f. é. m alternative ;

2° Une seconde bobine perpendiculaire à la première, partagée en deux portions *b* et *c*, est dérivée entre les conducteurs principaux avec une résistance supplémentaire *non inductive*. Le courant qui traverse ces spires est donc *en phase* avec la f. é. m.

Ce champ tournant entraîne le disque dans un sens qui est lié au sens même du retard et un ressort antagoniste limite la déviation, laquelle peut indiquer par suite la valeur de cos φ.



CHAPITRE IV

ETUDE SOMMAIRE D'UN ALTERNATEUR

Comme on l'a vu, en commençant l'étude des dynamos, les courants prennent naissance dans les machines sous la forme alternative; ils ne sont recueillis, à l'état continu, que grâce à un artifice (collecteur Gramme). On comprend donc dès maintenant que les *alternateurs* sont d'une construction plus simple que les *dynamos* à courant continu.

Les machines à courants alternatifs ont d'ailleurs précédé les dynamos proprement dites. En effet, les courants d'induction étaient à peine découverts (année 1831) qu'un constructeur parisien *Pixii* (1832) imaginait une machine formée d'un aimant tournant devant deux bobines à enroulements fixes et inverses : entre les deux extrémités du circuit, on recueillait ainsi un courant changeant de sens à chaque demi-révolution; le premier alternateur était créé.

Cet appareil, convenablement modifié par *Clarke* et quelques fabricants, a conduit à des types encore employés de nos jours en *électrothérapie*; il a servi enfin de principe à de grosses magnétos dont quelques-unes restent aujourd'hui chargées de l'éclairage de phares.

Actuellement les *alternateurs* sont tous à excitation électromagnétique : ce sont donc des *dynamos* et leur fabrication a pris un développement extraordinaire surtout depuis que les *transformateurs* et les *moteurs à courants alternatifs* ont permis d'utiliser d'une manière si commode ce genre de courants.

Parties essentielles d'un alternateur. — Une machine comprend essentiellement :

1° Un *inducteur*;

2° Un *induit*, siège de la production du courant.

Il n'y a pas lieu d'y ajouter le *collecteur* car cette pièce, quand elle existe, est réduite à un organe mécanique de construction extrêmement simple.

Type d'alternateur. — Nous prendrons l'un des premiers modèles construits, celui de *Siemens* : l'inducteur (fig. 467) est constitué par deux couronnes d'électros

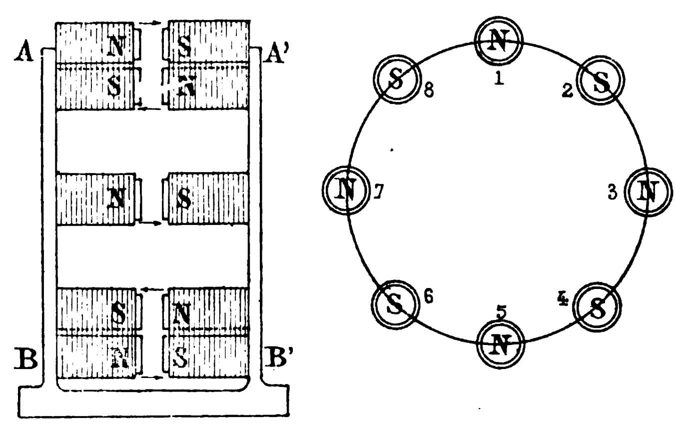


Fig. 467.

montées parallèlement sur deux disques AB et A'B' servant de flasques à la machine. Les pôles d'une même circonférence sont alternativement nord et sud et de plus deux pôles en regard sont aussi de noms contraires. Si nous supposons, comme dans la figure, huit doubles pôles, nous voyons que huit fois par tour, le sens des lignes de force se trouve inversé dans l'entrefer.

L'induit de cette machine est constitué par des bobines plates, sans noyau magnétique, tournant entre les pôles inducteurs.

Génération des courants dans une bobine. — Faisons une coupe de la machine par un plan partageant l'entrefer en deux parties égales. Nous avons devant nous (fig. 468) huit pôles alternés divisant la couronne en huit régions marquées I, II, III, etc. Nous pouvons partager chacune d'elles en deux moitiés par les lignes $x_1 x_1$, $x_2 x_2$ et nous remarquons que, depuis le premier pôle N jusqu'en $x_1 x_1$, les lignes de force marchent d'arrière en avant de la figure ; puis de $x_1 x_1$ à $x_2 x_2$, leur marche est contraire, c'est-à-dire d'avant en arrière et ainsi de suite. Considérons donc une bobine induite unique tournant dans l'entrefer et prenons-la successivement dans toutes ses positions. Nous remarquons d'abord que les lignes de force sont surtout serrées

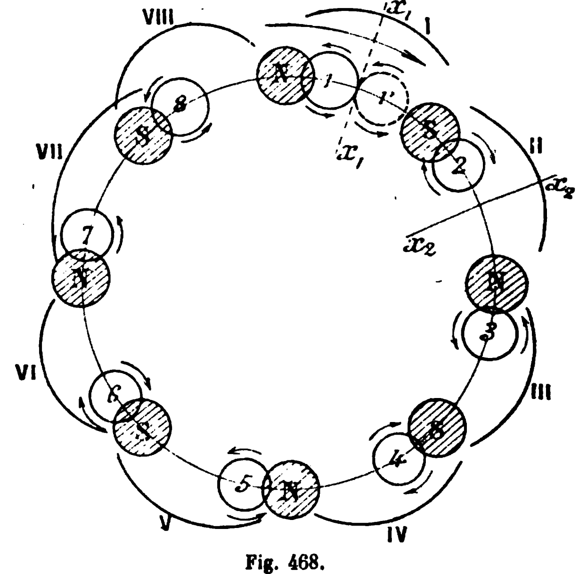


Fig. 468.

devant les pôles et au contraire sont rares dans le voisinage des lignes médianes telles que $x_1 x_1$:

1° Soit la position 1. A partir de N le flux, dirigé d'*arrière en avant, décroît*. Nous devons donc, pour obtenir le sens du courant, faire marcher le tire-bouchon de Maxwell d'*arrière en avant* d'où résulte le sens de rotation marqué par les flèches de 1.

2° Soit la bobine en 1'. Le flux, dirigé d'*avant en arrière* est *croissant*; donc retirons le tire-bouchon d'*arrière en avant* et nous obtenons le sens du courant marqué par les flèches de 1'.

Remarquons maintenant que le courant a conservé un sens invariable depuis le pôle N jusqu'à S, soit dans tout l'intervalle marqué I.

3° La bobine, maintenant en 2, est traversée par des lignes de force qui vont encore, comme en 1', d'*avant en arrière* mais qui *diminuent* de nombre à mesure que nous avançons vers x_1. On vissera donc d'*avant* en *arrière* d'où le sens de courant marqué.

On constate que ce sens est opposé à celui de l'intervalle I; il se conserve d'ailleurs dans toute l'étendue de II.

Si nous continuons le même raisonnement pour un tour entier, nous trouvons que, huit fois par tour, le courant se renverse dans la bobine mobile.

Il serait encore facile de faire voir que ces courants partiels renversés devant chaque pôle, prennent un maximum de valeur au moment où nous passons les lignes x_1, x_2....

Nous résumerons donc le phénomène en disant que, dans la machine figurée, la bobine est le siège de courants alternatifs à raison de quatre périodes complètes par révolution et si la partie mobile fait N tours par seconde, nous avons une fréquence

$$n = 4\,N$$

Courant total de l'induit. — Généralement l'induit est composé d'autant de bobines qu'il y a d'espaces polaires, soit huit dans la machine figurée. Ces bobines étant également espacées, nous voyons qu'elles sont les sièges de courants alternativement d'un sens et de l'autre, à un moment donné. Il s'agit de coupler convenablement ces divers courants. On pourrait les grouper en quantité, mais ordinairement c'est le couplage en tension que l'on adopte : les diverses bobines sont enroulées dans des sens alternés quand on passe de l'une à la suivante et l'on obtient ainsi, comme le montre la figure 469, la

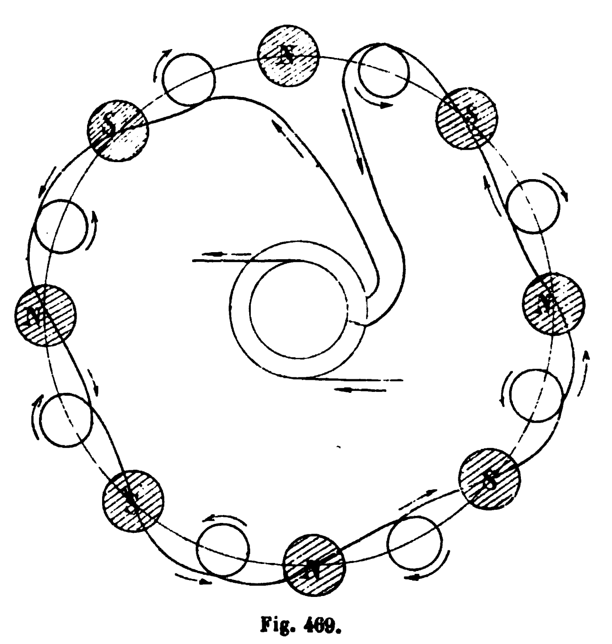


Fig. 469.

mise en série de toutes les bobines. Evidemment on atteint le même résultat en *enroulant* toutes les bobines dans le même sens et en établissant entre elles des *connexions alternées*.

Génération des courants diphasés.— Jusqu'ici nous avons supposé que l'on voulait obtenir des courants alternatifs simples ou *monophasés*. Indiquons maintenant comment cette même machine étudiée précédemment peut fournir des courants *diphasés*: chaque intervalle polaire reçoit alors *deux* bobines induites au lieu d'une seule et ces divers enroulements sont équidistants. La figure 470 montre quatre bobines, garnissant deux intervalles successifs. On les a désignées par A, B, A′, B′. D'après ce qui a été vu précédemment, le courant produit dans A′ est en discordance complète avec celui de A : entre les deux existe donc une différence de phase d'une demi-période. On a vu d'ailleurs l'artifice qui permet de réunir en tension tous ces courants alternés de A, A′, etc. Nous obtenons donc un premier courant alternatif dans le circuit AA′. Quant à la bobine B, équidistante de A et de A′, elle est le siège d'une f. é. m. qui avance ou retarde d'un quart de phase sur la f. é. m. de A. Dans B′ le courant est contraire de celui de B et nous pouvons, par des connexions alternées, réunir d'une manière concordante ces divers circuits. Nous avons donc un deuxième courant décalé sur le premier d'un quart de période.

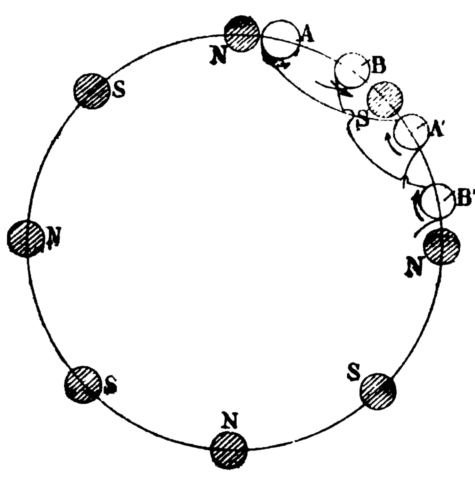


Fig. 470.

Pour recueillir les deux courants *diphasés*, il nous faut *quatre* bagues, au lieu de deux, isolées sur l'arbre de rotation et réunies respectivement aux quatre extrémités des deux circuits.

Génération des courants triphasés. — Il s'agirait d'obtenir trois courants décalés, l'un par rapport à l'autre, d'un tiers de période. Si nous nous reportons à la figure 468, nous voyons que la partie induite doit parcourir tout l'espace compris entre un pôle, N par exemple, et un autre semblable, N par conséquent, pour l'accomplissement d'une période complète. Pour obtenir les trois courants voulus, il suffit donc de diviser cet espace en trois parties par trois bobines équidistantes. Nous aurions ainsi au total, dans le cas d'une machine à huit pôles, douze bobines partagées en trois séries de quatre mises en tension séparément.

Mais on préfère généralement augmenter autant que possible le nombre des bobines. On divise alors en trois parties, non pas l'espace NN, mais NS (fig. 471); on a ainsi 24 bobines que l'on réunit encore en trois séries de huit en alternant les connexions de l'une

à la suivante. Si nous prenons comme origine de phase celle de la bobine A, nous voyons, dans C, une différence de phase de $\frac{1}{3}$ sur A ; le courant de la série des bobines telles que C est donc convenable; mais il n'en est pas de même des bobines B. En effet le courant de B avance sur le courant de A de $\frac{1}{6}$ période; mais nous pouvons prendre cette bobine dans un sens contraire à celui des autres enroulements et de cette manière nous provoquons une nouvelle différence de phase égale à $\frac{1}{2}$, laquelle ajoutée à la première, soit $\frac{1}{6}$, donne

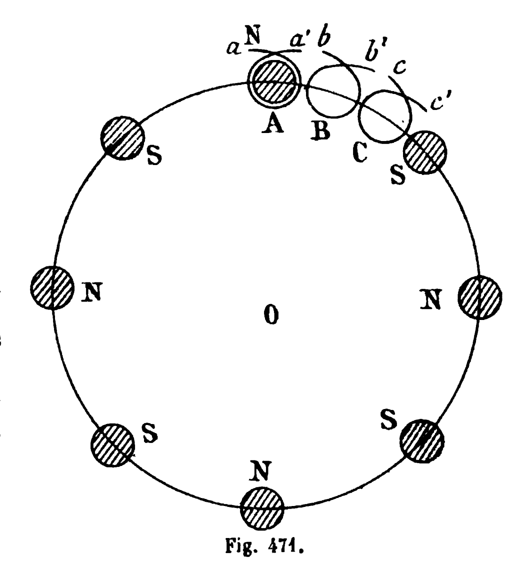


Fig. 471.

$$\frac{1}{6} + \frac{1}{2} = \frac{2}{3}$$

valeur demandée.

Le groupement des trois courants, suivant les deux modes indiqués page 441, est facile à établir :

1° Si on veut la disposition *en étoile*, on donne aux trois circuits un point commun et on fait partir les trois conducteurs de la ligne des trois extrémités libres. Quelquefois un quatrième fil est utilisé; il part du point commun et sa section est réduite car ce conducteur n'est destiné à transporter que des courants relativement faibles et seulement quand les diverses *phases* ne sont pas également chargées.

2° Le montage *en triangle* s'obtient en fermant en court-circuit les trois enroulements et en faisant partir les fils de la ligne des trois entresections.

Caractéristique externe de l'alternateur. — Nous avons dit (voir page 339) que la f. é. m. aux bornes d'une dynamo à courant continu, marchant à vitesse constante et à excitation invariable, est fonction uniquement du débit de la machine. Dans un alternateur, les conditions sont un peu plus compliquées. Et en effet nous devons tenir compte de la self-induction du circuit extérieur, autrement dit du décalage φ dû à ce circuit. On pourrait ici écrire, en appelant e la différence de potentiel efficace entre les bornes et I l'intensité efficace

$$e = f(\text{I}, \varphi)$$

Dans ces conditions il faudrait une *surface* pour représenter le fonctionnement de l'alternateur mais on peut se placer dans des conditions particulières : supposer par

exemple au circuit extérieur une self-induction invariable ou encore une intensité constante. Dans ces cas, une courbe plane représente la *caractéristique externe* de l'alternateur. En particulier si φ est fixé, la relation entre e et I est représentée par une courbe elliptique AB (fig. 472).

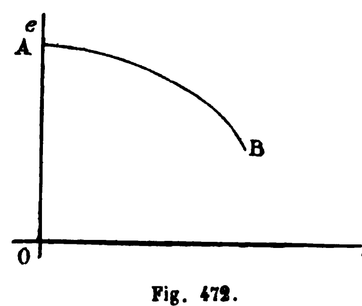


Fig. 472.

Ainsi, dans ces conditions, la différence de potentiel aux bornes diminue à mesure que nous augmentons le débit.

CHAPITRE V

ÉTUDE DES INDUCTEURS

Modes d'excitation des inducteurs. — Les bobines des électros doivent être alimentées d'un courant *continu.* Ce courant peut provenir d'une machine séparée, et c'est le cas le plus fréquent, mais on peut encore le produire par transformation d'une portion du courant de l'alternateur lui-même.

Dans le premier cas, la machine à courant continu s'appelle *excitatrice.* Elle est quelquefois complètement distincte de l'alternateur mais (surtout dans les machines de faible puissance) les deux organes générateurs de courant continu et de courants alternatifs sont montés sur un même arbre de rotation. C'est cette disposition que l'on appelle souvent *auto-excitatrice.*

L'auto-excitation véritable consiste à *redresser* une partie du courant produit par l'alternateur au moyen d'une *commutatrice* spéciale représentée schématiquement (fig. 473). Cet appareil, semblable extérieurement à un collecteur Gramme, est formé d'autant de lames qu'il y a de pôles dans l'alternateur, soit huit dans la figure ci-contre. Ces lames numérotées de 1 à 8 communiquent entre elles de deux en deux, c'est-à-dire d'une part toutes les touches impaires, de l'autre toutes les lames paires. Deux balais F et F′ distants d'un huitième de circonférence appuient toujours sur deux touches consécutives ; ils amènent au redresseur une dérivation prise sur le circuit alternatif.

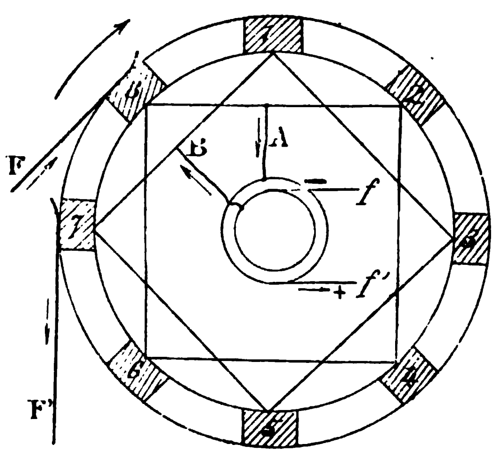


Fig. 473.

Or le calage des touches est tel que le changement de sens de l'électricité se produit au moment précis où une lame vient remplacer sa voisine sous l'un des balais ; il en résulte que les touches d'une certaine parité (paires par exemple) servent toujours à

l'*entrée* du courant dans le redresseur. Les deux séries paire et impaire sont réunies, comme on le voit, à deux bagues isolées montées sur l'arbre entre lesquelles deux balais f et f' recueillent un courant constamment de *même sens*. Ce courant *redressé* est *ondulé*, on le conçoit, mais la grande valeur de la self-induction des bobines inductrices atténue ces variations continuelles *d'intensité*. Ce système d'*auto-excitation* des alternateurs employé surtout dans les machines *Ganz et Cie* demande une légère modification quand la tension produite est très élevée; il faut alors, avant de faire passer le courant dérivé dans le redresseur, abaisser sa tension : on y arrive par l'emploi d'un transformateur spécial.

La forme de la caractéristique nous a montré, dans les alternateurs comme dans les dynamos à courant continu, que la différence de potentiel aux bornes décroît quand augmente le débit. Différents systèmes de *compoundage* ont été employés dans ces dernières années pour maintenir constante la tension. Nous dirons quelques mots de deux d'entre eux quand nous aurons étudié un peu plus complètement les machines alternatives.

Différentes formes des inducteurs. — Les systèmes inducteurs peuvent se rapporter à trois grandes classes:

1° Inducteurs fixes avec induit mobile;

2° Inducteurs mobiles avec induit fixe;

3° Inducteurs et induit fixes, machines à fer tournant.

Dans chacune de ces classes, les inducteurs sont, comme on l'a déjà indiqué, *multipolaires* et leur disposition pratique varie beaucoup d'une machine à l'autre. Nous allons examiner, d'une manière générale, quelques dispositifs et, à titre d'exemples, nous verrons différents cas particuliers.

Alternateurs à inducteurs fixes et induit mobile. — Cette machine est la première qui a été employée; elle découle en effet immédiatement de la construction des dynamos à courant continu. Les machines de cette classe sont formées d'une culasse en acier à l'intérieur de laquelle rayonnent les noyaux des bobines d'excitation.

Dans la partie centrale tourne l'induit et, en raison de cette mobilité, on fait aboutir les extrémités de ce circuit à deux, trois ou quatre bagues isolées montées sur l'arbre de rotation. On recueille ainsi au moyen de deux, trois ou quatre balais des courants, soit mono, soit tri, soit enfin diphasés.

Quant au courant continu d'excitation, il est amené à deux bornes reliées aux extrémités du circuit inducteur fixe.

Cette disposition des alternateurs présente un triple inconvénient :

1° peu de solidité mécanique de l'induit partie la plus délicate des enroulements ;

2° difficulté d'obtenir un bon isolement quand on veut une tension élevée ;

3° existence d'un collecteur, très simple il est vrai, mais demandant une certaine surveillance quand il s'agit de hautes tensions.

Pour ces différentes raisons les alternateurs à induit mobile sont à peu près abandonnés ou réservés exclusivement aux cas de *petites puissances* et de *faibles tensions*.



Fig. 474.

La fig. 474 nous montre un alternateur *Brown Boveri et Cie* dans lequel l'inducteur *fixe* est constitué par une couronne en fonte siliciée, en deux pièces, sur laquelle sont rapportés huit noyaux. L'induit est un anneau en tôles de fer recevant huit bobines montées sur bois et solidement fixées à la périphérie de l'anneau.

On voit (fig. 475) un alternateur triphasé (80 kva) de la *Compagnie de Fives-Lille*. Son inducteur fixe est en acier doux, de

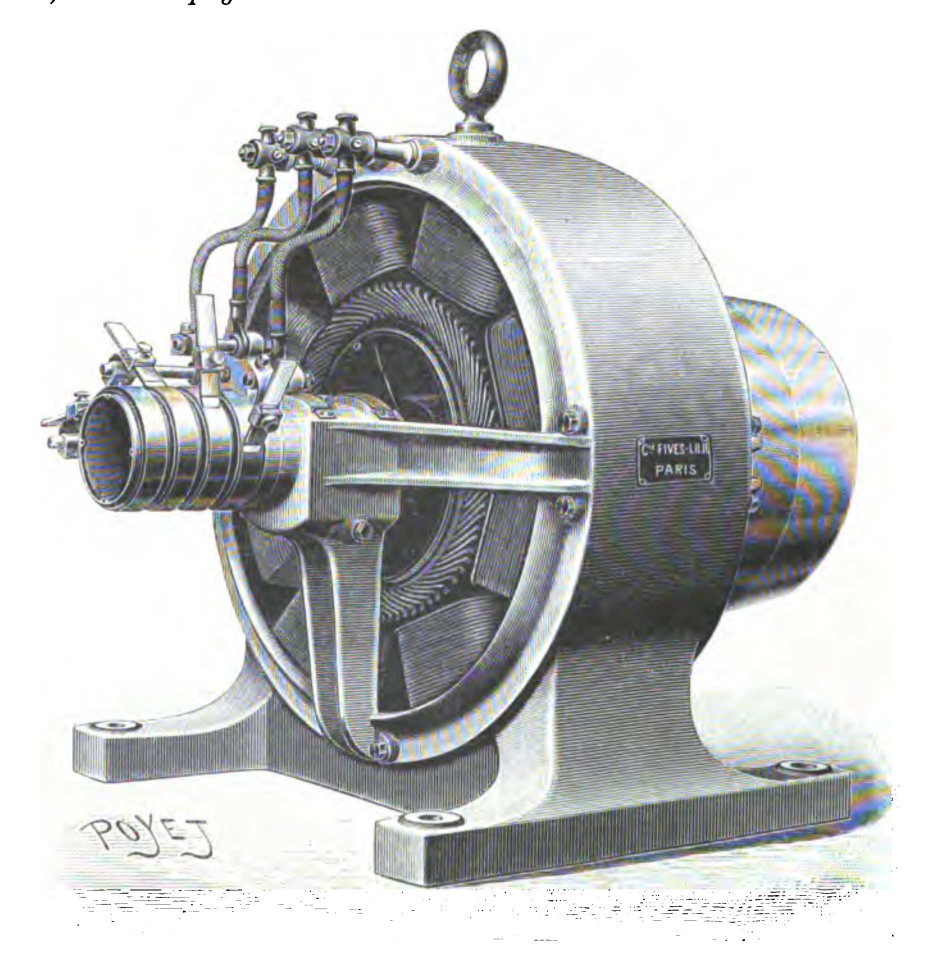


Fig. 475.

forme annulaire avec dents intérieures portant les bobines magnétisantes. L'induit mobile est *à tambour*.

Alternateurs à inducteurs mobiles. — C'est le système de beaucoup le plus employé actuellement.

Cette classe peut d'ailleurs être divisée en un certain nombre de catégories suivant le nombre des bobines employées :

1° Il y a autant de bobines que de pôles inducteurs ;

2° Il n'existe qu'un pôle bobiné sur deux ;

3° La bobine inductrice est unique.

1° *Alternateurs dont tous les pôles sont bobinés.* C'est à cette catégorie que se rattachent à peu près tous les alternateurs usuels.

Une pièce mobile porte tous les noyaux, bobinés alternativement dans des sens opposés de manière à présenter des pôles successifs N. S. N. etc.

Les figures 476 et 477 nous montrent un alternateur triphasé de *Ganz et Cie de Budapest*, de 1200 kva. Le système inducteur mobile est constitué par une sorte de double volant sur lequel sont vissés les noyaux de bobines. Les bobinages sont effec-

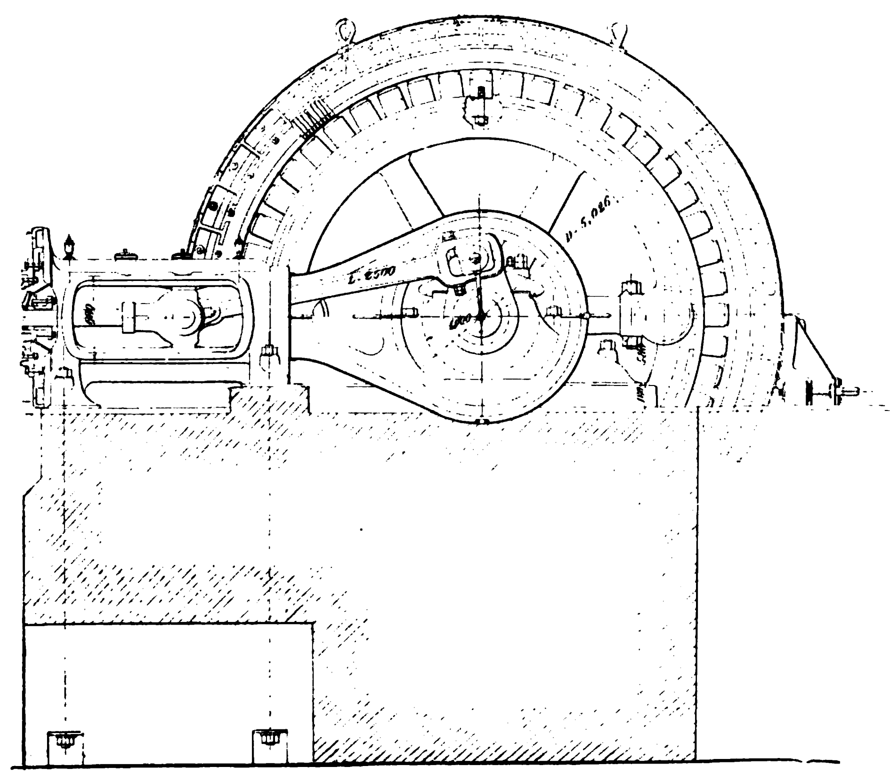


Fig. 476.

tués au moyen d'un ruban de cuivre ; on les alimente par une excitatrice qui est montée

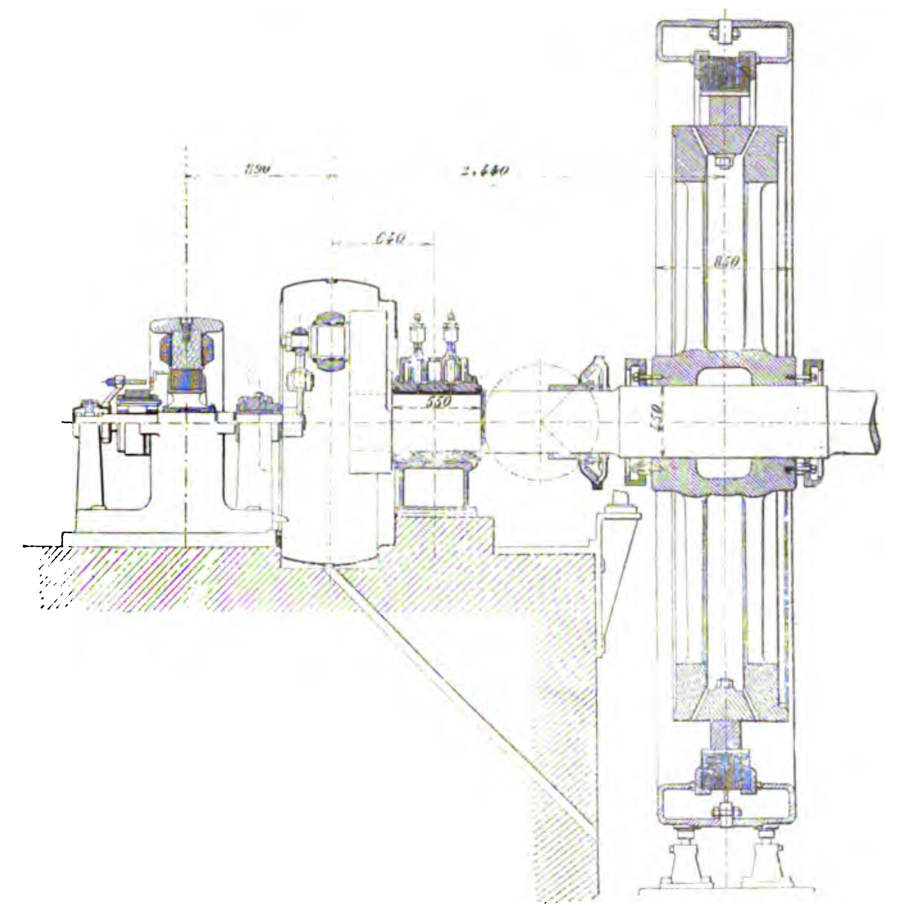


Fig 477.

sur l'arbre même de la génératrice et que l'on voit sur la figure 477.

La carcasse magnétique fixe est en quatre parties et sur elle est rapportée une couronne lamellée destinée à recevoir les enroulements induits logés en rainures et isolés à la micanite.

Le réglage de l'entrefer se fait au moyen de vis fixées dans les supports de la partie fixe.

Nous avons (fig. 478) un autre alternateur *Ganz* de plus petite puissance et construit par les *ateliers du Creusot*.

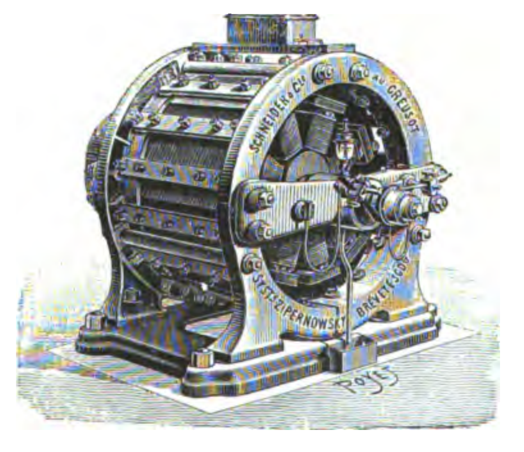


Fig. 478.

Les bobines inductrices, au nombre de dix, sont montées sur des noyaux formés par l'assemblage de tôles découpées en V (comme le montre la fig. 479, partie gauche)

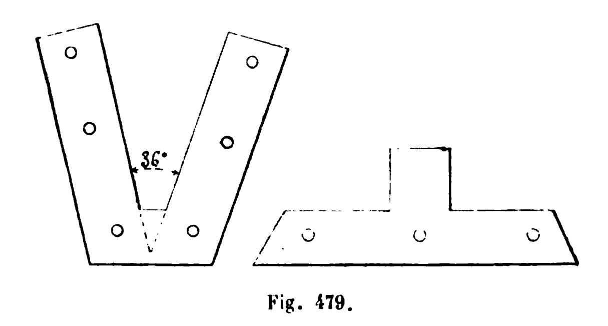


Fig. 479.

et isolées électriquement les unes des autres. Les joints des tôles sont d'ailleurs alternés dans le but de réduire la réluctance des circuits magnétiques. L'induit, extérieur aux inducteurs, est formé de bobines montées sur tôles découpées en ⊥ (fig. 479, partie droite) et assemblées sur la carcasse de l'alternateur (fig. 480). Cette machine, grâce

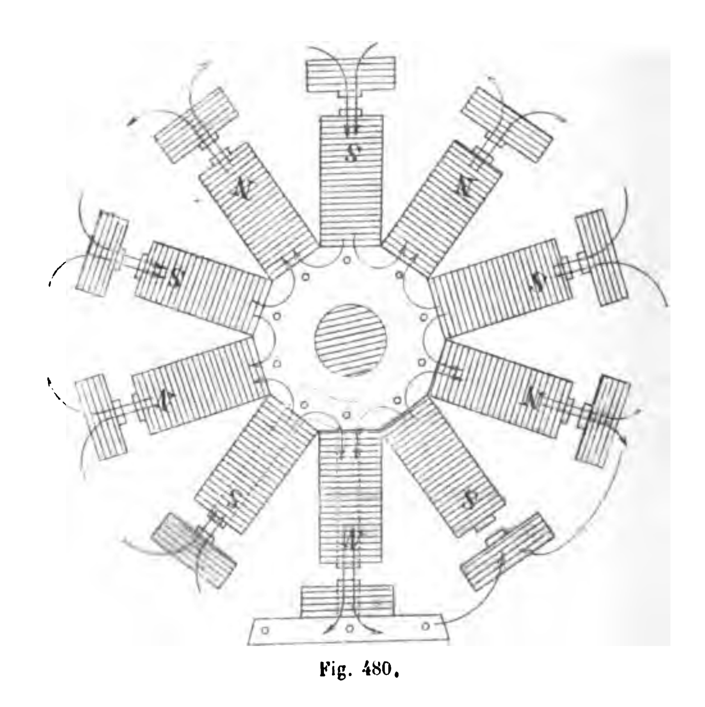


Fig. 480.

au redresseur indiqué, page 453, peut s'exciter elle-même sans nécessiter une dynamo spéciale.

On a représenté (fig. 483) un autre générateur alternatif (*diphasé*) de 250 kva, modèle *Hutin-Leblanc-Farcot,* à inducteurs mobiles.

Le système en mouvement constitue, comme on le voit, le volant de la machine à vapeur. Il porte 72 pôles feuilletés, en tôles de 2 millimètres d'épaisseur. Ces lames sont fixées à la périphérie du volant (fig. 481 et 482) par des boulons B réunis d'un côté à la couronne F et maintenus d'autre part par des pièces rapportées T. Les 72 bobinages sont d'ailleurs partagés en deux circuits mis en parallèle.

On voit que les épanouissements polaires logent chacun six lames de cuivre que l'on réunit entre elles, en court-circuit, sur une longueur de quatre pôles consécutifs. Ces conducteurs supplémentaires constituent, comme nous le verrons plus loin, une sorte d'induit de moteur à champ tournant ; c'est un *amortisseur*, qui est destiné à maintenir le synchronisme de deux alternateurs semblables groupés en parallèle.

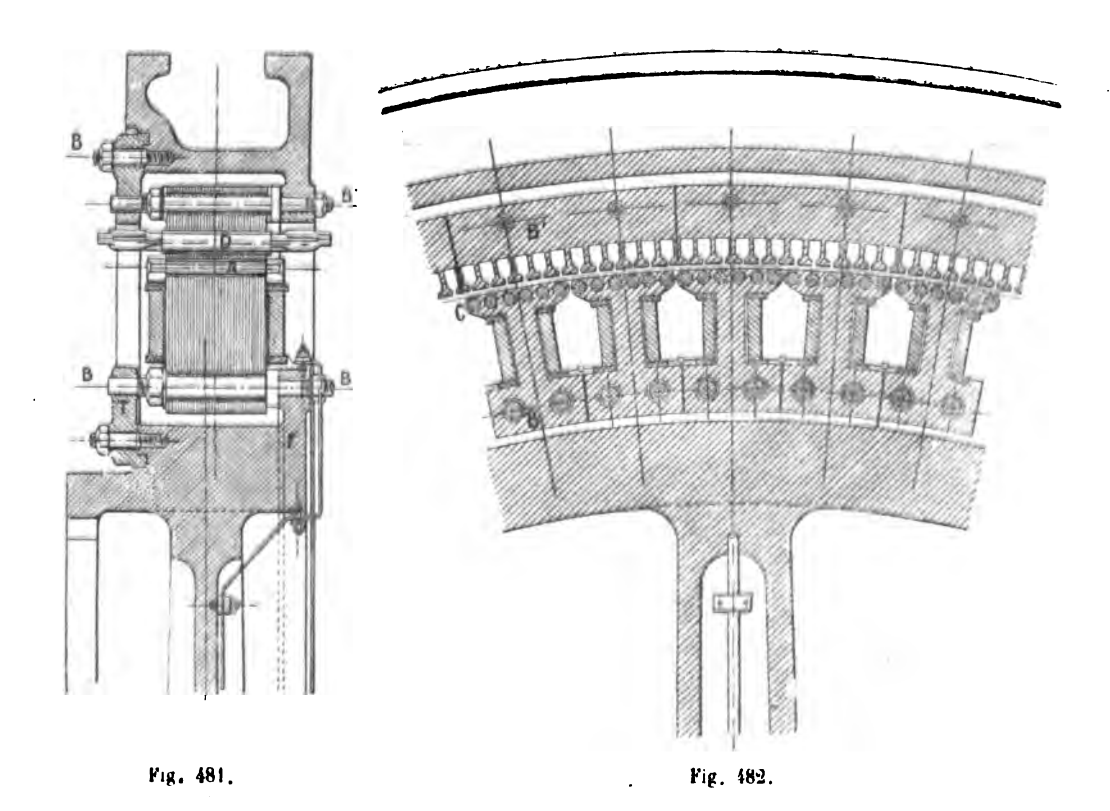


Fig. 481. Fig. 482.

Quant à l'induit de l'alternateur, il est disposé dans des rainures, au nombre de six par pôle inducteur.

La figure 484 nous montre un autre alternateur *Farcot* à inducteurs mobiles et induit fixe, construit pour des puissances moyennes, 40 kva. On aperçoit deux manivelles dont le rôle est de déplacer en bloc toute l'armature de manière à permettre la visite des diverses parties de l'alternateur.

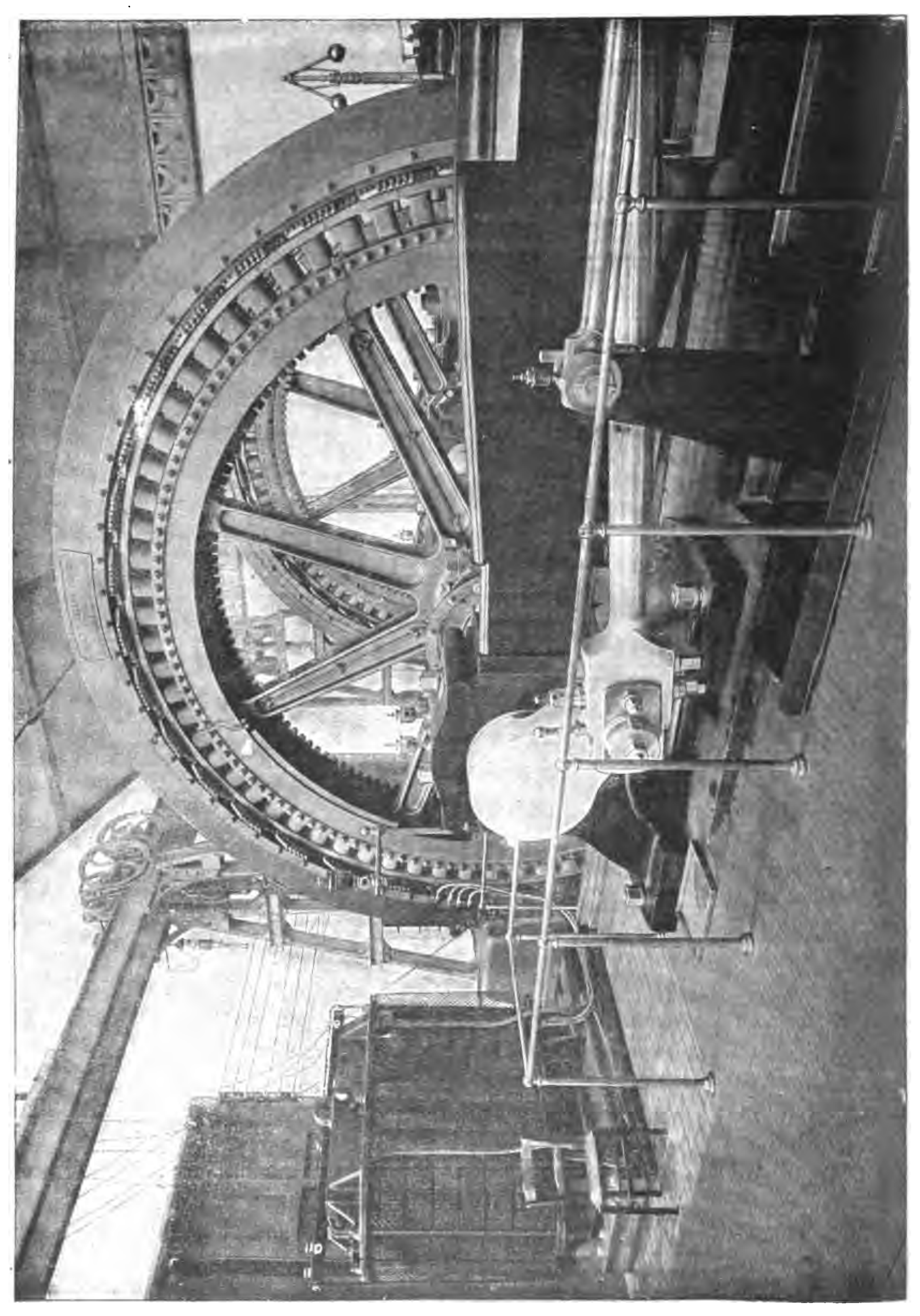


Fig 483.

Indiquons encore, dans cette catégorie très importante de machines deux alternateurs *Brown-Boveri et Cie*.

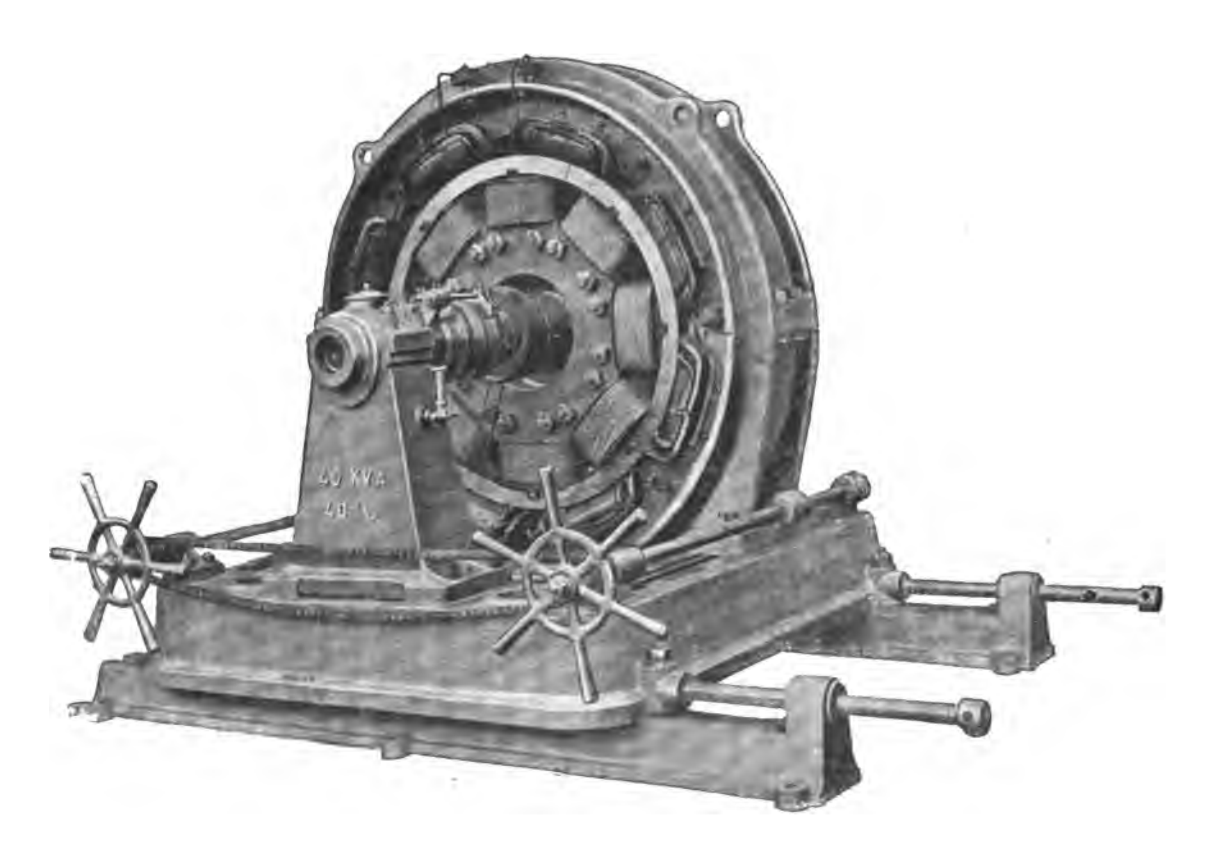


Fig. 484.

La figure 485 se rapporte à une génératrice-volant de 1500 kw ; elle nous donne une vue en plan avec coupe partielle. Nous voyons que la jante du volant a une section en forme d'U. Les pièces polaires sont rapportées sur des fraisures extérieures et maintenues par des vis traversant la jante. Cette dernière est reliée au moyeu par un seul rang médian de bras. Les bobinages sont faits au moyen de bandes de cuivre roulées à plat et isolées entre elles. On obtient ainsi une grande rigidité pour ces enroulements mobiles.

L'armature est une roue complète entourant le système inducteur et portée par deux séries de bras rayonnant autour de deux anneaux venus de fonte avec les paliers. Le système est ainsi parfaitement rigide. On peut d'ailleurs, après enlèvement de vis de butée, donner à toute l'armature un mouvement qui permet la visite ou la réparation d'une portion de l'armature.

La carcasse de cette armature est faite de deux flasques en fonte qui viennent prendre entre elles et entourer les tôles qui dépassent à l'intérieur pour recevoir les enroule-

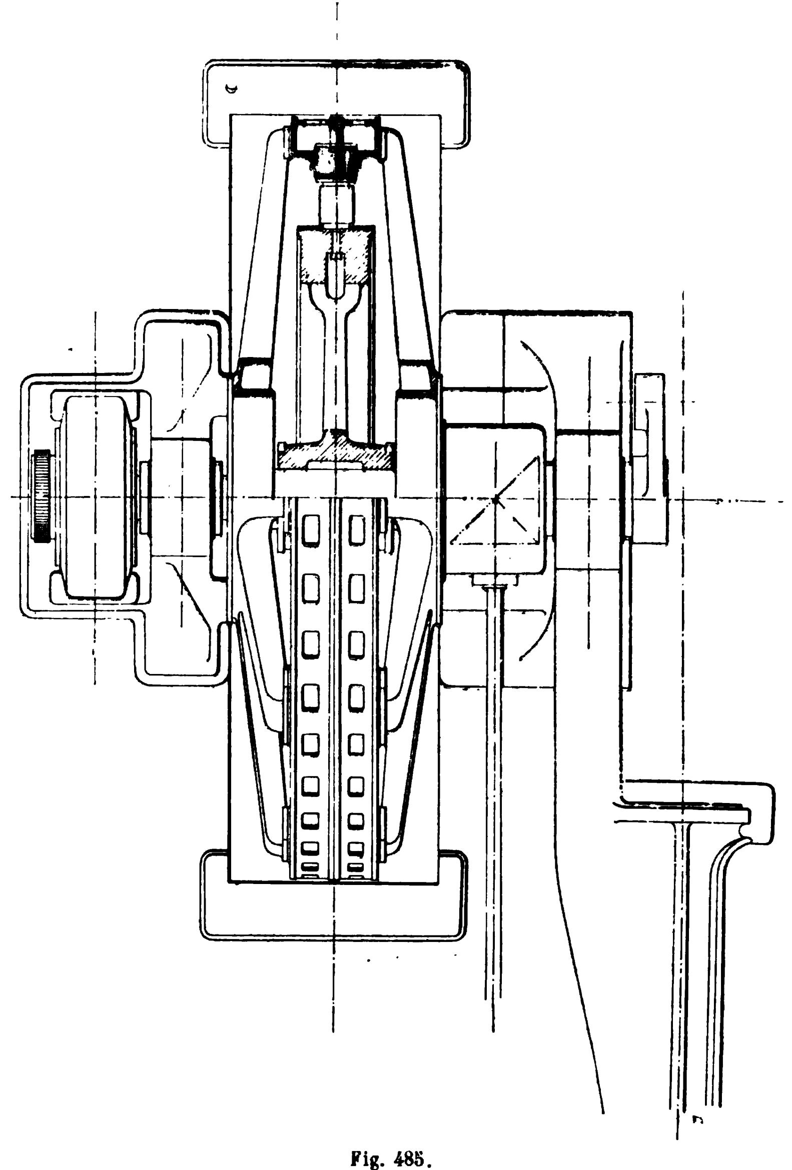


Fig. 485.

ments induits. Les deux flasques sont serrées par deux rangs de boulons, le premier est extérieur aux tôles et le second traverse ces lames en même temps que les joues des flasques.

Quant aux bobinages induits, ils sont passés daus des *trous* pratiqués dans les tôles.

La figure 486 nous montre une génératrice beaucoup moins puissante, soit de 350 chevaux. C'est un type *à volant extérieur*. Ce volant est à large jante et cette jante est réunie au moyeu par une série de bras désaxés, de façon à laisser un côté libre, sur lequel sont rapportées des pièces polaires. Comme on le voit, les vis de fixation ne traversent pas toute la jante mais aboutissent à une rainure profonde pratiquée dans l'épaisseur.

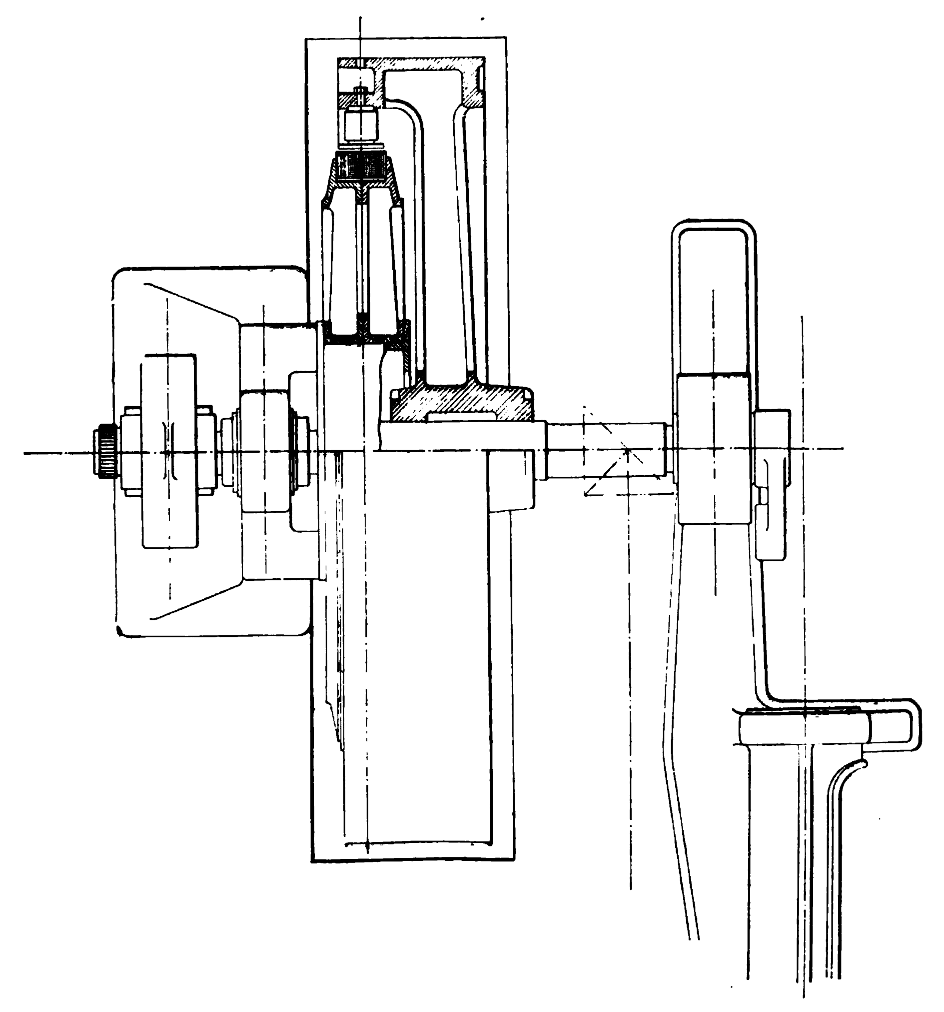


Fig. 486.

Tout l'ensemble de la partie tournante présente donc une portion creuse : laquelle est destinée à loger l'armature. Cette pièce est en deux parties boulonnées et repose sur deux demi-anneaux en fonte. Le demi-anneau inférieur se prolonge jusqu'au palier voisin avec lequel il fait corps; le demi-anneau supérieur est de la largeur de l'armature et il peut coulisser sur le précédent par l'intermédiaire de vis de rappel placées sur le palier. De cette manière on peut facilement visiter les diverses parties de la machine.

Quant à l'assemblage des flasques et des tôles, il est le même que dans le modèle précédent.

La disposition *externe* du volant augmente le moment d'inertie, à masse égale, et de plus l'action magnétique devient *centripète* ; elle est opposée à la force *centrifuge* et diminue dès lors le travail élastique du métal.

L'alternateur-volant *Patin* rentre encore dans cette série de machines ; il est représenté (fig. 487). Son inducteur sert de volant au moteur à vapeur ; il comprend deux

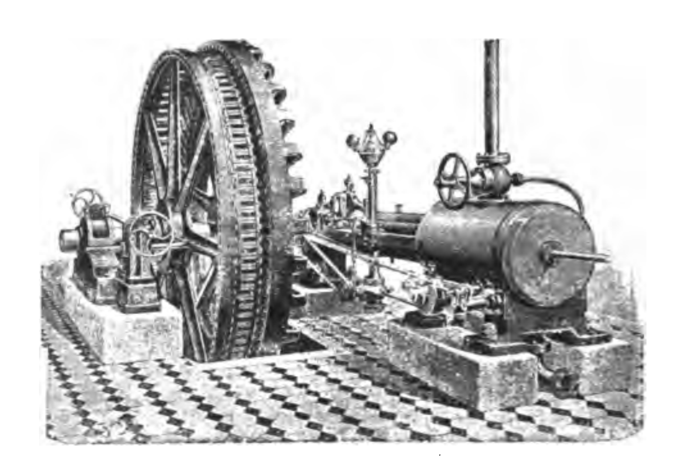


Fig. 487.

rangées radiales de bobines dont les noyaux, en fer doux, sont encastrés dans deux couronnes concentriques en fonte (fig. 488). Ces pôles sont alternés sur une même couronne et deux extrémités en regard présentent des polarités opposées. Quant à l'induit, il est fixe et formé de bobines ovales portées par une roue légère qui peut être déplacée latéralement, le long de l'arbre, pour la visite des divers bobinages.

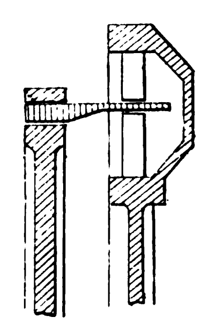


Fig. 488.

2° *Alternateurs dont la moitié seulement des pôles est bobinée.* — Cette disposition, assez peu employée d'ailleurs, est semblable à celle que nous avons indiquée (page 368) dans le cas d'une machine dynamo. Généralement sur un moyeu sont implantés un certain nombre de pôles, le tout d'une même coulée. Ces pôles, de large section sont destinés à rester nus. Entre eux on rapporte les noyaux qui doivent être bobinés. Ces bobinages sont d'ailleurs de même sens, de façon que tous les pôles bobinés soient de même nom ; les pôles intermédiaires prennent alors tous le nom contraire et les circuits magnétiques se trouvent réalisés.

3° *Alternateurs dont les inducteurs mobiles comprennent une seule bobine.* — Imaginons un électro-aimant à bobine unique : nous pouvons munir les deux extrémités du noyau de pièces *segmentées* autant que nous le voudrons : nous constituerons

autant de pôles distincts et de même nom qu'il y aura de divisions. Ce mode de production de pôles multiples au moyen d'une bobine unique peut être appliqué de diverses manières parmi lesquelles nous signalons les suivantes :

1° Le noyau de fer peut être continué par deux pignons à dents courbes, comme dans l'alternateur *Mordey Victoria*. La figure 489 nous montre dix dents de chaque côté et ces dents se correspondent comme on le voit. Entre deux dents correspondantes, et de polarité par conséquent différente, règne un entrefer destiné à recevoir l'induit, qui est fixe. On remarque donc que les lignes de force sont toujours de même sens à travers cet induit ; seule la *grandeur* du flux varie : la machine est à *flux ondulé*. On voit facilement que le nombre des périodes est égal au nombre des pôles qui garnissent chacune des couronnes. La figure 490 donne une vue avec coupe par-

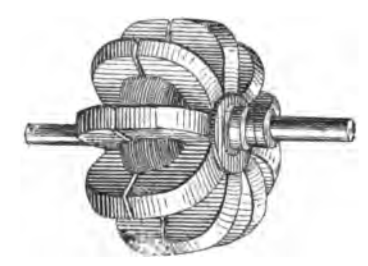


Fig. 489.

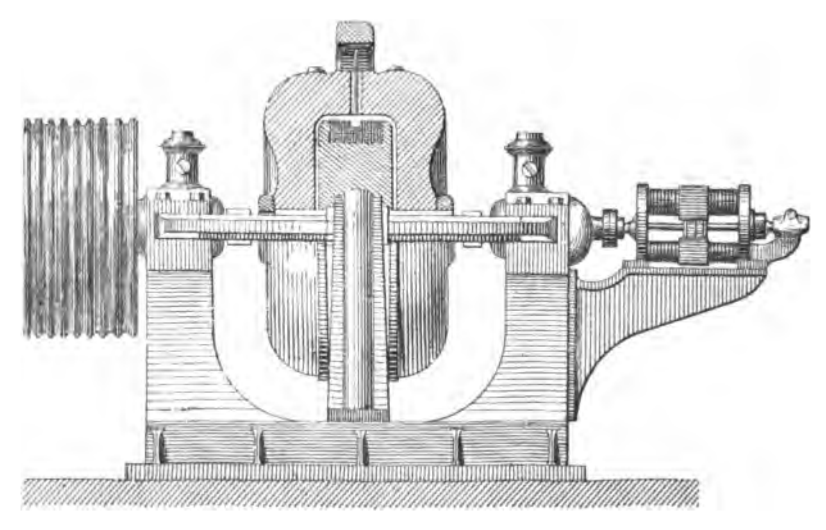


Fig. 490.

tielle de cette génératrice, construite par la Maison *Grammont* de *Pont-de-Chérui*. L'induit est formé de bobines plates enroulées sur porcelaine et isolées à la fibre ; l'enroulement entier est fixé dans un anneau de bronze relié d'une façon rigide aux paliers et au socle de la machine.

2° On peut encore munir l'une des extrémités du noyau d'une pièce dont les divisions alternent avec celles d'une autre pièce semblable fixée à la seconde extrémité du noyau. On constitue de cette façon une suite de pôles alternativement Nord et Sud comme pourraient le faire des bobines multiples. La figure 491 nous fait voir un système imaginé, il y a un certain nombre d'années, par les *ateliers d'Œrlikon* : l'inducteur est constitué par une poulie de fer, en deux pièces A et B, présentant une gorge destinée à

la bobine magnétisante C. Sur chaque face de cette poulie, on rapporte une couronne dentée telle que D et E. Les dents des deux pièces sont alternées et prolongées latérale-

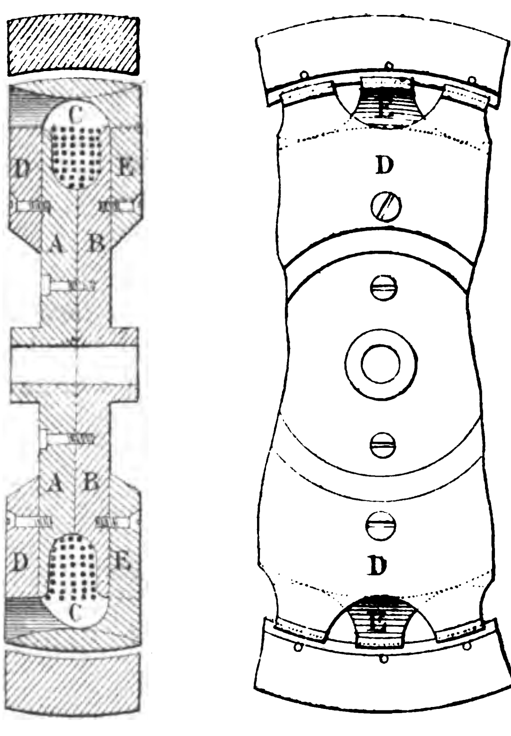


Fig. 491.

ment de toute l'épaisseur de la poulie. Dans ces conditions, si nous examinons la pièce terminée, par sa tranche, on aperçoit une série de touches qui appartiennent successivement à une face et à l'autre ; ce sont donc des pôles N, S, N, etc. quand le courant passe dans la bobine C. L'induit est un tambour creux entourant la pièce mobile et le bobinage est effectué dans une série de trous ou d'encoches, suivant la disposition Brown.

Alternateurs à enroulements fixes ou à fer tournant. — Les machines de ce type, telles qu'on les construit aujourd'hui, présentent une certaine analogie avec les deux que nous venons d'indiquer ; elles se composent en effet ordinairement d'une couronne de fer tournante dont les dents viennent fermer le circuit magnétique, produit par la bobine unique, successivement à travers les diverses parties d'une armature fixe qui porte l'induit. De cette manière tout se passe comme si le flux créé était entraîné dans l'espace et envoyé dans les diverses sections de l'induit : ce flux, coupé par les divers fils, donne naissance aux courants induits.

Nous citerons deux modèles particuliers d'alternateurs *à enroulements fixes* :

La figure 492 nous montre l'induit d'un alternateur d'*Œrlikon*, pour courants triphasés. La carcasse extérieure, en deux parties, porte, à sa face interne, deux anneaux

de fer doux laminé percés de trous pour le passage des fils induits. Entre ces deux anneaux, on aperçoit un vide destiné à recevoir un anneau de bronze support de la bobine inductrice unique.



Fig. 492.

Tout le système indiqué jusqu'ici est fixe. La pièce mobile est un volant denté en



Fig. 493.

acier coulé représenté figure 493 (alternateur de 300 chevaux). Dans ce modèle, la pièce centrale, venue d'un seul jet de fonte, supporte une couronne d'acier qui est elle-même garnie de pièces polaires en tôles isolées. Dans des machines de moindre puissance, ce volant peut être coulé en une seule pièce.

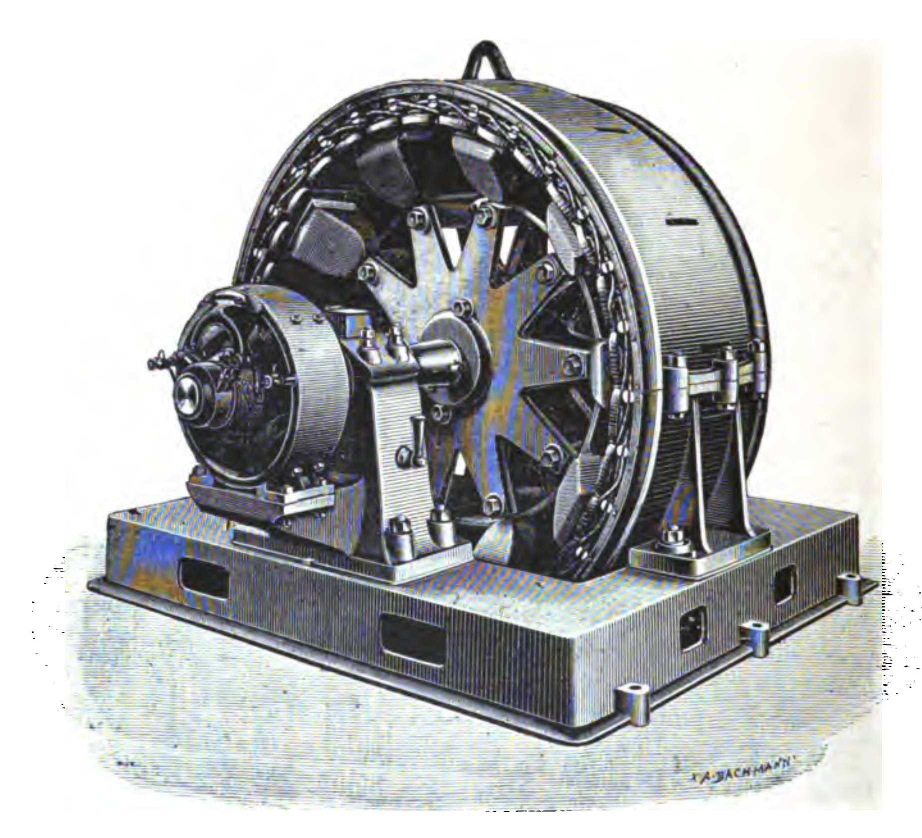


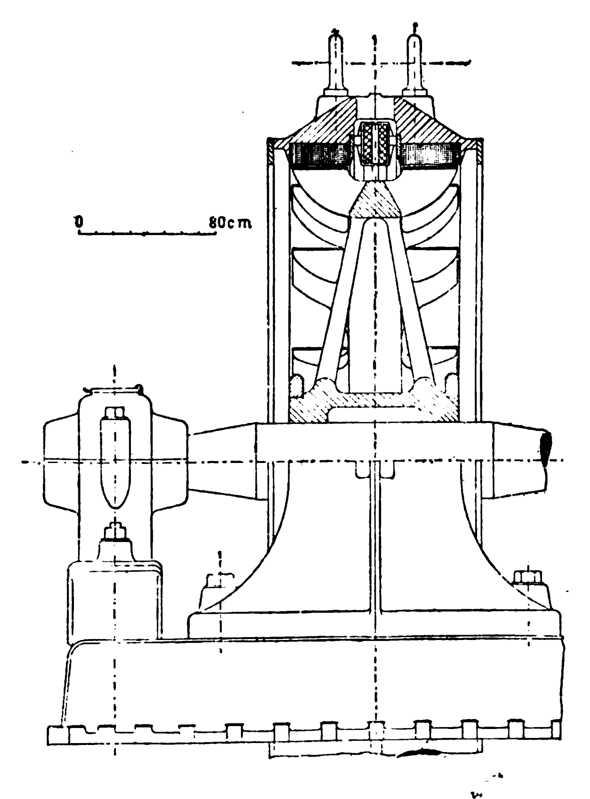
Fig. 494.

Si nous faisons une coupe radiale de cette machine par le milieu d'une dent, nous voyons que le circuit magnétique est constitué par la portion de couronne et ses deux dents, les anneaux de fer de l'induit et enfin l'armature externe de la machine.

La figure 494 reproduit l'ensemble de la génératrice de 300 chevaux, avec l'excitatrice portée par l'axe de la machine.

D'après la disposition même de l'induit, on voit que l'on recueille deux courants distincts qu'on peut à volonté coupler en quantité ou en tension.

L'alternateur *Thury* (fig. 495) rentre dans la même catégorie. La culasse fixe est en acier doux et de section en U. Dans la gorge de cette sorte de couronne est logée la bobine magnétique unique tandis que les bobinages induits sont effectués dans des couronnes de tôles isolées rapportées. Le fer mobile est une couronne à double denture reliée par des bras radiaux au moyeu de la roue.



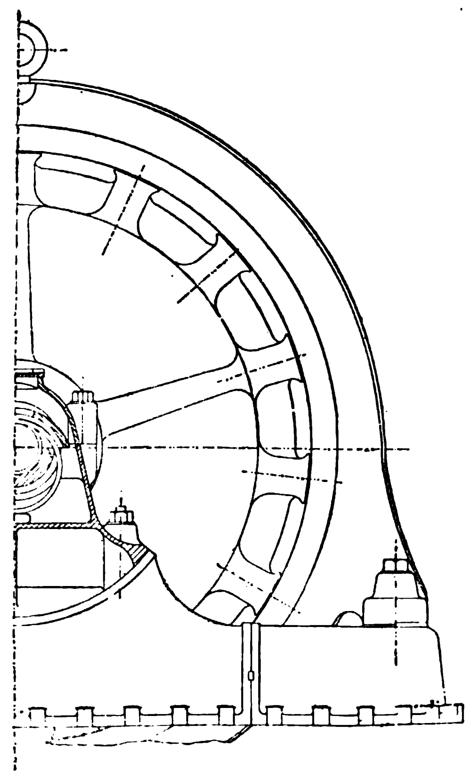


Fig. 495.

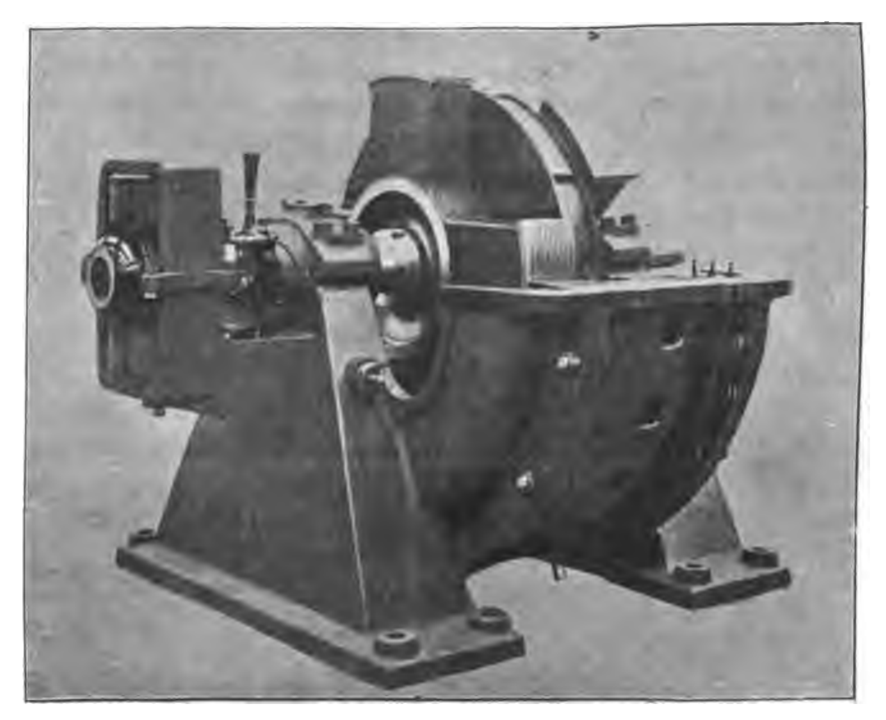


Fig. 496.

Citons encore dans cette catégorie un alternateur *Brown-Boveri et Cie* (fig. 496) représenté débarrassé de son armature induite dans sa moitié supérieure. Cette machine diffère essentiellement des précédentes en ce que le fil induit passe à travers les deux anneaux feuilletés de l'armature et en ce que la pièce mobile est formée de bras alternés, ceux de gauche par exemple coïncidant avec les espaces vides de la partie droite. On voit sur l'arbre de cet alternateur, une excitatrice Brown, indiquée page 368.

On indiquera enfin un alternateur à flux ondulé de MM. *Sautter*, *Harlé et Cie*; il comporte aussi un seul induit mais on a disposé deux inducteurs M et M' (fig. 497) par-

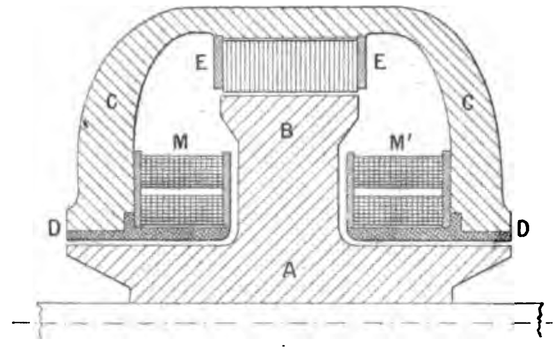


Fig. 497.

tagés chacun en deux parties ; ces bobines sont fixes et la seule pièce mobile est formée d'un moyeu A claveté sur l'arbre de rotation et présentant quatre saillies B venues d'une même coulée.

La carcasse magnétique de l'induit est une enveloppe d'acier C, en deux pièces, terminée par deux couronnes de fer forgé D qui entourent les parties extrêmes du moyeu et supportent en même temps les bobines magnétisantes. On comprend donc la constitution du circuit magnétique. Les tôles destinées à l'induit sont placées à l'intérieur de la carcasse et serrées entre deux plateaux de bronze E. On remarquera que cette machine présente trois entrefers dont l'un est compris entre la carcasse et la partie extérieure des tôles induites. L'enroulement est triphasé et la puissance de 60 kva.

Ces alternateurs *à fer tournant* ou *à enroulements fixes* présentent un certain nombre d'avantages surtout dans le cas d'unités assez puissantes :

1° Economie d'excitation par suite de la réduction à une seule du nombre des bobines ;

2° grande *stabilité* des enroulements, aucun danger de détérioration et par suite de courts-circuits ;

3° Absence de contacts mobiles aussi bien pour amener le courant continu d'excitation que pour capter les courants alternatifs.

CHAPITRE VI

ETUDE DE L'INDUIT

D'une manière générale, l'induit d'un alternateur peut être disposé de deux manières distinctes : *avec* ou *sans* noyau de fer. Si on supprime le métal magnétique, on évite les courants de Foucault et l'hystérésis, pertes d'énergie considérables dans les machines de grande fréquence, mais alors on augmente l'entrefer et par suite la résistance magnétique ; il faut compenser cet effet par un accroissement de la force magnétomotrice c'est-à-dire de l'excitation.

D'un autre côté la présence du fer accroît la self-induction et par conséquent le retard du courant obtenu sur la force électromotrice d'où une diminution de la puissance de l'alternateur.

Quant à la forme même des induits, elle est, comme dans les dynamos continues, *en anneau, en tambour* ou *à disque*.

Induits en anneau. — Ils sont, comme dans l'armature Gramme, bobinés sur une pièce magnétique. Supposons une machine à courants alternatifs simples. Si l'inducteur comprend $2n$ pôles, nous donnerons à l'induit $2n$ bobines. Cet induit est ou intérieur aux pôles inducteurs (fig. 498) ou bien extérieur. Si nous prenons la dispo-

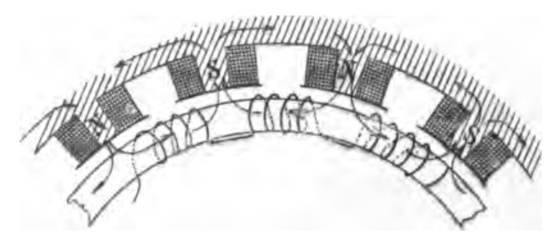


Fig. 498.

sition de la figure, nous voyons de suite que deux bobines consécutives sont, à un moment donné, traversées par des flux opposés ; il s'ensuit donc que les courants développés sont contraires et, pour les rendre concordants, il faut :

Ou bien changer le sens du bobinage quand on passe d'une section à la suivante (c'est ce qui est figuré) ;

Ou bien donner à toutes le même sens, mais alterner les connexions.

La figure 499 montre un alternateur *Labour*, de la société *L'Éclairage électrique*,

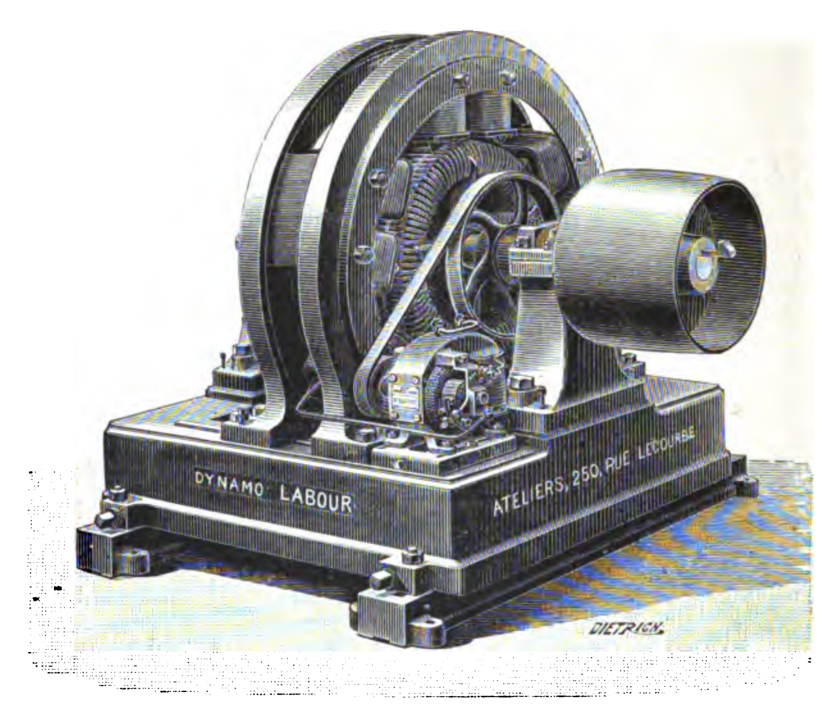


Fig. 499.

qui comprend un induit annulaire denté et mobile à l'intérieur des pôles inducteurs. Les bobines sont montées deux par deux sur des lames de fer en formes d'U, empilées et serrées entre deux flasques de fonte. On voit l'excitatrice entraînée, avec multiplication de vitesse, par l'arbre même de l'alternateur.

La disposition de la figure 498 s'applique à un alternateur monophasé. Elle doit être modifiée quand on passe au cas d'une machine à courants polyphasés. Si on veut des courants à deux phases, il suffit, comme on l'a vu déjà, de doubler le nombre des bobines. Alors d'un enroulement au suivant, nous avons une différence de phase égale à un quart de période et nous pouvons former nos courants diphasés.

L'obtention de courants triphasés peut se faire de deux manières :

1° Soit en triplant le nombre des enroulements nécessaires dans le cas des courants alternatifs simples, en employant alors l'artifice signalé page 450.

2° En disposant, entre deux pôles de mêmes noms consécutifs, trois bobines au lieu de deux, et alors les trois circuits décalés d'un tiers de période sont constitués immédiatement.

Induits à tambour. — C'est la forme la plus ordinairement adoptée dans les alternateurs et elle ne diffère pas en principe de celle que nous avons indiquée dans le cas des dynamos à courant continu. Le tambour peut d'ailleurs être disposé de plusieurs façons. En effet, comme nous l'avons vu :

1° Les *inducteurs* peuvent être *fixes* et formés d'une série de pôles intérieurs à une culasse commune, comme dans les machines à courant continu. Dans ce cas, le tambour tourne à l'intérieur de ces inducteurs;

2° Les *inducteurs sont mobiles* à l'intérieur d'une couronne externe qui porte les bobinages induits;

3° Tous les *enroulements sont fixes*, mais une pièce de fer, en tournant amène successivement un flux de force devant les diverses sections du tambour extérieur. L'induit est donc identique dans ces deux derniers cas.

Le tambour, quand il est *mobile*, présente une grande analogie de forme avec celui d'une dynamo, mais il n'a pas de collecteur Gramme. Les deux extrémités de l'enroulement, s'il s'agit de courant à une seule phase, aboutissent à deux bagues isolées montées sur l'arbre.

Si l'induit est immobile, ses extrémités sont réunies simplement à deux bornes fixes.

Quelle que soit sa disposition, l'induit à tambour présente une constitution semblable. Nous allons examiner successivement la question pour alternateurs mono, di et triphasés.

Tambour pour courants alternatifs simples. — Nous supposerons, dans nos figures, ce qui est le cas le plus ordinaire, l'induit extérieur : le tambour devient alors un anneau creux, à la surface interne duquel doivent être assujettis les enroulements. La figure 500 suppose seulement six pôles alternativement Nord et Sud. Divisons l'armature en 24 parties égales et donnons au fil le point 1 pour origine. Admettons le mode d'induit *Brown*; on a creusé dans les tôles qui composent la couronne une série de trous qui se superposent et l'on fait passer le bout du fil par le canal marqué 1 : on gagne ainsi la face arrière de l'anneau puis, sur cette face, le conducteur est replié suivant 1-4; il est posé ensuite dans le trou 4 et repasse à 1 au moyen d'un segment 4-1, visible dans le dessin. En répétant ce procédé d'enroulement un certain nombre de fois, on finit par obtenir une bobine complète 1-4; les bobines 5-8, 9-12, etc., sont établies de la même façon et l'induit est alors terminé. Il nous est facile de comprendre la génération des

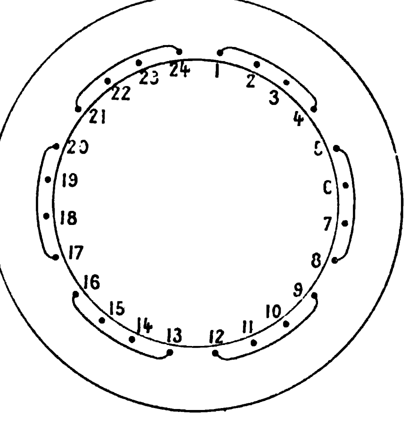


Fig. 500.

courants au moyen de cette disposition. Développons en effet l'armature (fig. 501) et

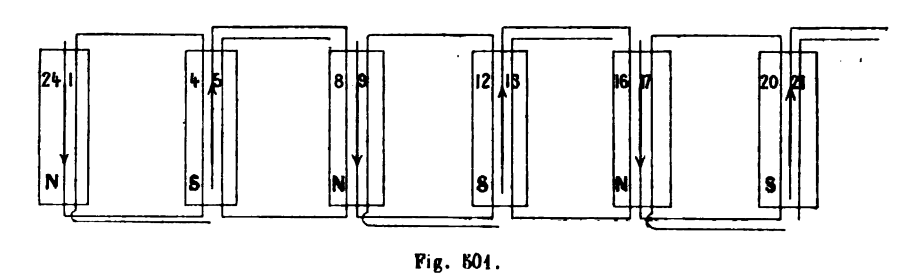


Fig. 501.

marquons les positions des divers pôles consécutifs N, S, etc. : la première bobine est placée dans les trous 1 et 4, la seconde dans 5 et 8, etc., et tous ces enroulements sont ensuite connectés. Marquons, par des flèches, les sens des courants obtenus dans les divers fils; ces sens sont renversés quand nous passons d'un pôle au suivant et l'on voit aisément que toutes les portions d'une même bobine ajoutent leurs tensions; si nous mettons tous ces enroulements en série, nous avons une f. é. m. totale qui égale la somme de celles qui sont dues à toutes ces sections.

Nous avons supposé, dans la figure 501, un induit genre Brown; les conducteurs alors doivent être passés séparément dans leurs logements. Mais ici, comme dans le cas des dynamos, on peut fendre les tôles entre les trous et la périphérie et, de cette façon, il devient possible d'enrouler à l'avance les fils sur un mandrin de manière à former des bobines que l'on fait passer dans les canaux destinés à les recevoir. Ces bobines étant convenablement assujetties, on rabat leurs extrémités sur les faces planes du tambour comme le montre la figure 500.

Cette manière de bobiner les tambours des alternateurs n'est pas la seule : on peut encore faire usage de systèmes analogues à ceux que nous avons indiqués dans le cas des machines à courant continu (induits imbriquées ou en zigzag).

Nous avons supposé une série de pôles inducteurs alternativement Nord et Sud; il est possible aussi de faire usage de pôles tous identiques comme nous l'avons vu en particulier dans le cas des machines à fer tournant (exemple : alternateur d'*Œrlikon*, page 465). La disposition des fils doit alors être différente. Reprenons, dans cette hypothèse, le développement de la figure 501. Les deux pôles successifs N et N (fig. 502) étant de même nom, produisent, au même instant, dans les fils *a* et *b*, des courants de même sens; il faut donc doubler le nombre des bobines comme l'indique le dessin.

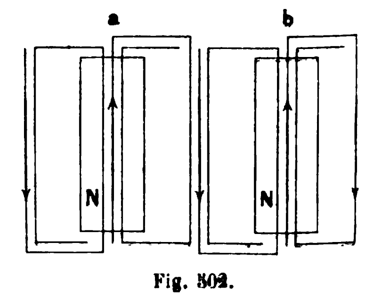


Fig. 502.

Tambours pour courants diphasés. — Ils diffèrent des tambours monophasés par le nombre des bobines qui est doublé dans les diphasés. Prenons encore un cas particulièrement simple pour expliquer la

disposition des conducteurs : soit (fig. 503) un induit de machine à six pôles alternés. Divisons la circonférence du tambour en 24 parties égales et ménageons, en chacun des points de division, des trous pour recevoir les fils. Nous formerons, comme dans le cas d'une machine monophasée, une série de bobines 1-4, 5-8, 9-12, etc. et nous couplerons en série tous ces enroulements : un premier courant alternatif sera obtenu dans ce circuit. Une seconde série de bobines est formée dans les trous restés libres soit dans 3-6, 7-10, 11-14, etc. Remarquons que le fil 3 est le siège d'une f. é. m. qui présente une différence d'un quart de phase sur celle de 1 et, en effet, l'intervalle de deux pôles consécutifs (contraires) est de $\frac{24}{6} = 4$ divisions ; il correspond à une demi-période ; donc entre 1 et 3, nous avons un quart de phase. Les courants de ces bobines 3-6, 7-10, etc., sont tous concordants entre eux et présentent donc une différence d'un quart de phase sur les premiers : on a constitué un *induit diphasé*. On voit sur la figure 503 la disposition des bobines après enroulement : les unes sont rabattues sur les faces planes du tambour, tandis que les autres restent relevées et de cette manière, on évite tout croisement de conducteurs pouvant présenter une grande différence de potentiel.

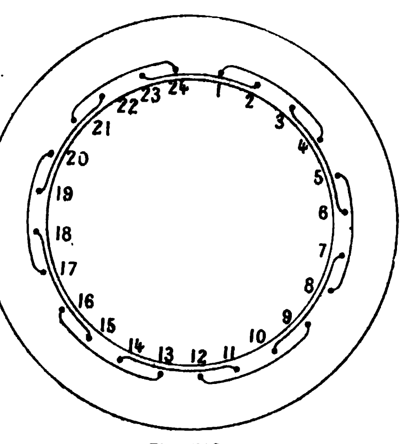


Fig. 503.

On passerait facilement de ce cas, où les pôles sont alternés à celui de pôles tous de même nom d'un même côté ; il suffirait en effet de doubler alors le nombre des enroulements.

Tambours pour courants triphasés. — Il nous faut maintenant trois séries de bobines également espacées sur la surface du tambour. Soit (fig. 504) le cas très simple d'un alternateur à huit pôles alternés. Divisons encore la périphérie du tambour en 24 parties et perçons les tôles en chacun de ces points de division. L'intervalle polaire étant de $\frac{24}{8} = 3$ divisions, formons une première bobine entre les génératrices 1 et 4, puis une seconde entre 7 et 10, une troisième entre 13 et 16 et enfin une dernière de 19 et 22. Il est facile de comprendre que les f. é. m. produites dans ces huit positions 1, 4, 7, etc., sont concordantes ; nous avons donc entre les extrémités 1 et 22 un premier courant alternatif. On a représenté ce premier circuit par

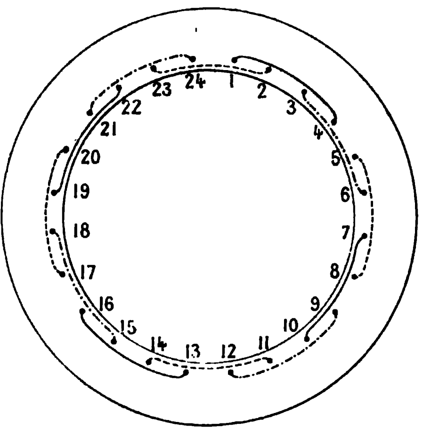


Fig. 504.

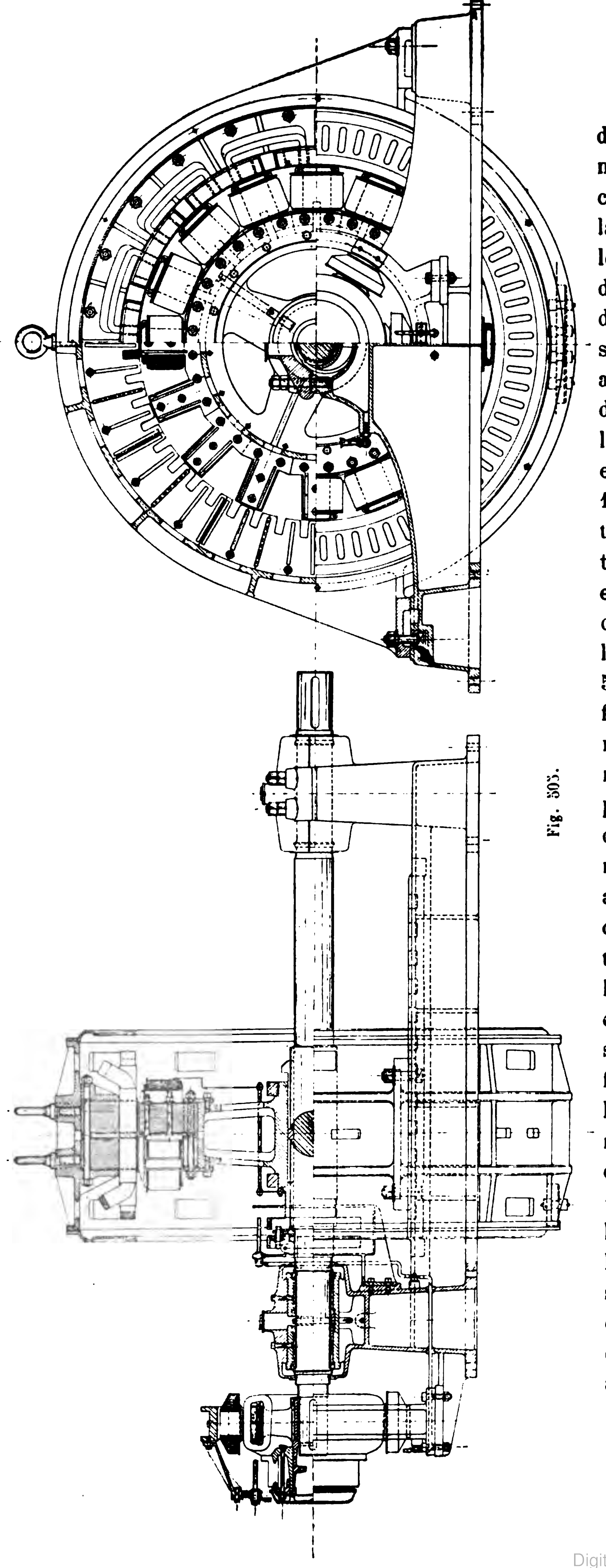


Fig. 505.

des traits pleins.) Si nous considérons le conducteur 3; il est (si la rotation se fait dans le sens des aiguilles d'une montre) en avance d'un tiers de période sur 1; la bobine 3-6 avance donc elle-même d'un tiers de phase sur la bobine 1-4 et il en est de même de 9-12, 15-18 et 21-24; ces quatre bobines, représentées en pointillé, réunies en série, constituent le deuxième circuit. Enfin les quatre enroulements 5-8, 11-14, 17-20 et 23-2, figurés en pointillé forment le troisième courant décalé d'un tiers de période sur le second et de deux tiers sur le premier. Les trois courants alternatifs sont ainsi constitués. Pour éviter tout croisement des bobines appartenant à des circuits différents, on a soin de rabattre sur les faces planes du tambour les extrémités des enroulements de deux en deux, c'est-à-dire de 1-4, 5-8, 9-12, etc. On laisse au contraire les bobines intermédiaires, soit 3-6, 7-10, 11-14, etc., dans la situation que la mise en place leur a donnée.

La figure 505 repré-

sente une génératrice triphasée des ateliers d'Œrlikon de puissance de 500 chevaux; elle est à seize pôles alternés; on voit les 48 logements destinés à recevoir les 24 bobines formant l'induit; chaque circuit comporte par conséquent huit bobinages réunis en tension. Cette figure nous montre encore, sur l'élévation et sur la coupe transversale, la disposition donnée aux conducteurs, après leur mise en place, pour empêcher les contacts entre les divers circuits. On remarque la possibilité de déplacer latéralement la carcasse de l'induit et l'excitatrice montée sur l'arbre même de la machine.

Induits à disque. — Ils sont constitués par des conducteurs enroulés en bobines plates et situés entre deux séries de pôles inducteurs comme nous l'avons supposé dans le type étudié page 447. Nous pouvons en considérer deux espèces distinctes suivant que tous les pôles situés d'un même côté du disque sont tous de même nom ou bien alternés. Ce deuxième cas est le plus fréquent et nous avons vu (page 449) que les bobines en nombre égal au nombre des couples de pôles inducteurs sont les sièges de courants alternatifs, rendus concordants par une connexion alternée des bobines consécutives.

L'alternateur *Ferranti* (fig. 506) est basé sur le même principe : on voit la disposi-

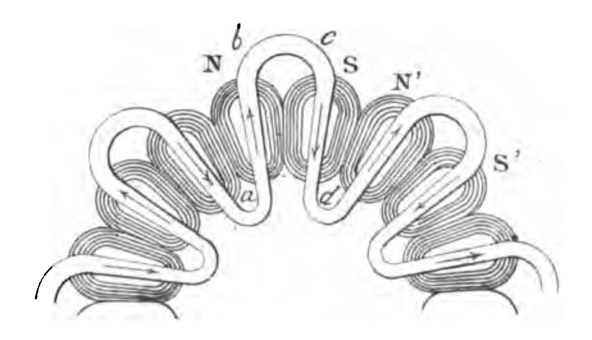


Fig. 506.

tion des inducteurs dont les noyaux ont une forme ovoïde; un ruban de cuivre *abcd* est contourné en festons de manière à présenter autant de parties radiales qu'il y a de pôles. Dans ces conditions, on voit que la f. é. m. induite dans *ab*, placé devant un pôle Nord, est contraire de celle qui naît dans *cd*; ces deux tensions s'ajoutent et il en est de même de toutes les autres. Quand le tour de l'induit est terminé, on lui superpose une seconde couche de conducteurs avec interposition d'un isolant convenable et on continue ainsi l'enroulement. On peut d'ailleurs ici encore remplacer l'ensemble des deux fils *ab* et *cd* par une bobine entière et réunir en série toutes les bobines semblables qui constituent notre induit; cela se fait surtout quand il s'agit d'obtenir des tensions élevées.

Lorsque tous les pôles d'une même couronne sont de même nom, il faut évidemment

doubler le nombre des conducteurs. Cela se présente en particulier dans l'alternateur Mordey, indiqué page 465.

Comparaison des divers systèmes d'induit. — Le système le plus usité est celui du tambour, comme dans les dynamos multipolaires :

1° Il permet en effet une meilleure utilisation des conducteurs ;

2° Il réduit la résistance intérieure de la machine ;

3° La self-induction est également diminuée, avantage plus appréciable encore dans les alternateurs que dans les dynamos, comme on le conçoit. C'est encore, en partie, pour diminuer la self-induction que l'on préfère souvent les induits rainés aux induits simplement percés de *trous* parallèles aux génératrices.

Les alternateurs *à disques* sont généralement dépourvus de fer dans l'induit. Cette absence de fer procure l'avantage de réduire aussi le coefficient de self et de supprimer les pertes par courants de Foucault et par hystérésis mais d'un autre côté, elle augmente l'entrefer et entraîne, de ce chef, un supplément de dépense pour l'excitation.

CHAPITRE VII

ETUDE GÉNÉRALE COMPLÉMENTAIRE DES ALTERNATEURS

Force électromotrice d'un alternateur. — Reprenons la machine Siemens qui nous a servi de type d'alternateur (page 447). Nous avons deux couronnes comprenant chacune $2p$ pôles alternés, p d'un sens et p de nom opposé, et admettons, pour faciliter notre calcul, que l'intervalle entre deux pôles voisins soit juste égal à la largeur d'un pôle; en outre les bobines induites couvrent exactement chacune des pièces polaires. Représentons (fig. 507) trois pôles consécutifs N, S, N, puis trois positions successives 1, 2, 3, d'une bobine induite (supposées dans la ligne N S N); enfin sur une droite xx', portons les valeurs de la f. é. m. aux différents instants: on voit que la f. é. m., nulle en 1, devant N, croît progressivement jusqu'à sa valeur maxima, atteinte dans la position moyenne entre N et S, et ainsi de suite. Quand la bobine est devant le pôle N, en 1, elle reçoit un flux de valeur $\mathfrak{N}$; ce flux est réduit à zéro quand nous arrivons en 2. La f. é. m. induite de 1 à 2, soit $e_{max.}$ s'exprime donc par

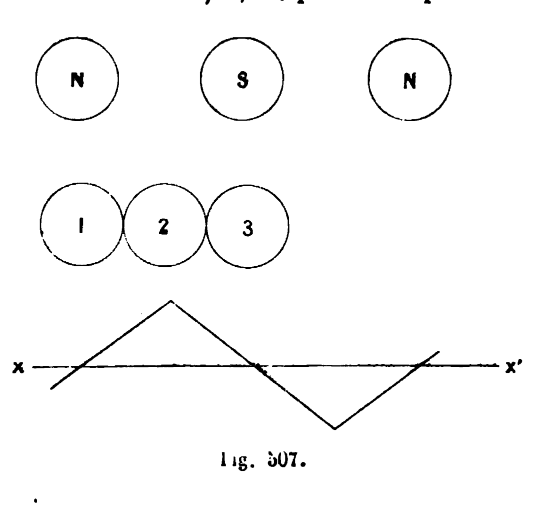


Fig. 507.

$$e_{max} = \frac{\mathfrak{N}}{\theta}$$

θ étant le temps nécessaire au déplacement de 1 à 2. Or on a, si N est le nombre des tours effectués en une seconde

$$\theta = \frac{1}{4p\mathrm{N}}$$

d'où

$$e_{max} = 4p\mathrm{N}\mathfrak{N}.$$

Or, chaque bobine comporte un certain nombre de spires et il existe $2p$ bobines semblables; toutes ces spires totales, de nombre n, sont, comme nous l'avons dit, réunies en tension, donc la f. é. m. maxima résultante s'exprime par

$$E_{max} = 4pn\mathrm{N}\mathfrak{N}$$

Pour calculer la f. é. m. efficace en fonction de $E_{max.}$, nous remarquerons que la courbe représentative du courant est sensiblement formée de lignes brisées comme l'indique la figure 507. Dès lors en appliquant à ce cas particulier, le procédé de calcul indiqué à propos des courants sinusoïdaux, nous obtenons :

$$E_e = E_{max} \times \frac{\sqrt{3}}{3}$$

Nous en concluons

$$E_e = \frac{4\sqrt{3}}{3} pn\mathrm{N}\mathfrak{N} = 2{,}31\, pn\mathrm{N}\mathfrak{N}$$

Nous remarquons qu'au facteur $\frac{2{,}31}{2}$ près, cette formule représente la f. é. m. d'une dynamo continue à $2p$ bobines reliées en tension.

D'une manière générale, si nous représentons par K un coefficient (qui a dans le cas particulier ci-dessus la valeur 2,31, et qui varie avec la forme et les dimensions des pôles et des bobines) on trouve que la f. é. m. d'un alternateur s'exprime par la relation :

$$E_e = \mathrm{K}pn\mathrm{N}\mathfrak{N} \text{ unités CGS}$$
$$= \mathrm{K}pn\mathrm{N}\mathfrak{N} \times 10^{-8} \text{ volts.}$$

La constante K, particulière à chaque machine, s'appelle souvent *coefficient de Kapp.*

Différence de potentiel efficace aux bornes de l'alternateur. — L'excitation de la machine étant ordinairement séparée, la question, à ce point de vue, est plus simple ici que dans le cas des dynamos. Mais nous avons par contre à faire entrer en ligne de compte, non seulement les résistances, mais encore les valeurs de la self-induction. Soient en effet :

R la résistance ohmique du fil extérieur;

R′ celle du circuit de l'alternateur;



L le coefficient de self du circuit d'utilisation;
L′ celui de la machine.

Appliquons la loi d'Ohm :

$$I_e = \frac{E_e}{\text{Impédance}} ;$$

Nous avons, dans le circuit total

$$I_e = \frac{E_e}{\sqrt{(R + R')^2 + \omega^2 (L + L')^2}}$$

De même, il vient, si nous appliquons la même loi au circuit extérieur, en appelant e la différence de potentiel aux bornes

$$I_e = \frac{e}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

Ecrivant l'égalité de ces deux expressions de I_e, il vient

$$\frac{e}{E_e} = \sqrt{\frac{R^2 + \omega^2 L^2}{(R' + R)^2 + \omega^2 (L + L')^2}}$$

Nous pouvons ainsi calculer le *voltage utile*.

La variation de cette *tension* peut être étudiée par l'emploi de la caractéristique. Nous avons vu (page 451) la forme de cette caractéristique dans le cas particulier d'un décalage φ invariable. Dans les alternateurs, de même que dans les dynamos à courant continu le plus ordinairement, la tension aux bornes décroît quand nous demandons à la machine un débit croissant. Cette baisse de tension serait d'ailleurs constatée encore si, au lieu d'augmenter le débit, on modifiait le décalage du courant sur la f. é. m. On estime comme chiffre moyen, qu'à excitation constante, la tension aux bornes varie, entre la marche à vide et à pleine charge, de 5 à 10 0/0 sur un circuit d'éclairage et jusqu'à 25 0/0 si le circuit est constitué par des moteurs ou d'autres charges inductives.

Si l'on veut maintenir e constant, on peut agir sur l'excitation : introduire ou retirer de son circuit des résistances convenables. Ce résultat est quelquefois obtenu par un réglage à la main; mais, dans d'autres cas, on dispose de systèmes automatiques qui maintiennent au courant alternatif un voltage sensiblement constant entre les bornes. Nous indiquerons plus loin deux systèmes spéciaux qui transforment l'alternateur en une machine *compound* ou *hypercompound*.

Puissance de l'alternateur. — En conservant les notations précédentes, c'est-à-dire en appelant :

e la différence de potentiel efficace aux bornes,

I_e l'intensité efficace du courant débité,

φ le retard de phase entre cette différence de potentiel et ce courant, nous avons pour valeur P de la *puissance utile*

$$P = e\, I_e \cos \varphi$$

Les trois facteurs qui donnent P, étant d'ailleurs reliés entre eux par une équation, nous voyons que la puissance utile dépend uniquement de deux variables, et non de

Fig. 508

trois, par exemple de la self-induction L et de la résistance R du circuit extérieur. Cette formule, vraie dans le cas de courants sinusoïdaux, doit être remplacée par

$$P = K e\, I_e$$

si nous prenons des courants alternatifs quelconques; dans cette nouvelle expression,



le facteur K, qui remplace cos φ est encore le *facteur de puissance*, fraction par laquelle il faut multiplier les watts *apparents* ou *volts-ampères* pour obtenir les watts *réels*.

Pour augmenter ce facteur, on a eu l'idée d'employer un condensateur de capacité appropriée mis en dérivation sur les bornes de l'alternateur; le décalage se trouve ainsi réduit et la puissance utile augmentée.

Rendement de l'alternateur. — Il se définit comme celui des dynamos. On nomme *rendement industriel* d'un alternateur le rapport de la puissance utile de cette machine à la somme des puissances consommées par l'alternateur et par son excitatrice.

La valeur de ce rendement, dans le cas d'un alternateur monophasé, est généralement inférieure à celle du rendement des dynamos, mais il n'en est pas de même dans les machines triphasées : leur rendement industriel atteint et dépasse même quelquefois 94 0/0; cette différence entre ces deux ordres d'alternateurs tient à une meilleure utilisation de l'espace réservé aux enroulements induits dans le cas des courants triphasés.

Quant au coût de l'excitation, on l'évalue, dans les machines moyennes, à 2 ou 3 0/0; cette dépense varie, dans les fortes unités, de 2 à 0,5 0/0.

Réaction d'induit. — Elle est considérable dans les alternateurs et l'on peut, sans atteindre un débit trop grand, mettre la machine en court-circuit.

Pour examiner très sommairement cette question, reprenons la machine Siemens qui nous a servi de type d'alternateur (page 447). Nous avons vu le sens du courant créé dans l'induit pendant le déplacement de la bobine de N à S (fig. 468). Ce sens est tel que le courant induit produit un flux dirigé d'arrière en avant, c'est-à-dire concordant avec celui de N. Nous distinguerons deux cas principaux qui se présentent ordinairement dans la pratique :

1° Le circuit n'a *pas de self-induction appréciable*; alors le *courant* concorde avec la f. é. m., son maximum a lieu par conséquent au moment où la bobine passe en xx; le circuit magnétique présenté à la spire est alors très résistant et la réaction d'induit a une importance négligeable.

2° Le circuit présente au contraire de la self-induction; le courant retarde donc sur la f. é. m.; le maximum d'intensité a lieu après le passage de la bobine dans la région xx, c'est-à-dire dans une région plus rapprochée de S que de N. Or ce flux est contraire à celui de S (qui est le plus voisin de lui), il en résulte donc un *affaiblissement* des champs inducteurs et, pour compenser cette diminution, on doit forcer les ampères-tours inducteurs.

Nous pourrions maintenant nous demander quel est l'effet produit quand le courant, au lieu de *retarder*, *avance* sur la f. é. m. (cas pouvant être dû à des capacités). Le maximum de *courant* se produit alors avant l'arrivée de l'induit en xx, c'est-à-dire



plus près de N que de S et les champs inducteurs sont renforcés par cette réaction de l'induit.

Compoundage des alternateurs. — Cette question, de la plus haute importance, a été résolue de différentes manières; nous indiquerons sommairement la solution de MM. *Hutin et Leblanc* et celle de M. *Boucherot.*

Le procédé *Hutin et Leblanc* (alternateurs *Grammont*) consiste à faire usage d'une excitatrice spéciale, dite *compoundeuse* dont les inducteurs sont alimentés de *courants alternatifs* de façon à créer un champ tournant dans la région de l'induit continu. Soit A (fig. 509) cet induit; il est entouré de deux parties annulaires B et C recevant des enroulements semblables à ceux des *stators* de moteurs polyphasés; l'un des deux bobinages est mis en série avec l'induit de l'alternateur, l'autre est alimenté par des dérivations prises entre les bornes; il en résulte donc que le premier stator reçoit des courants en phase avec les *courants débités*; le second est excité par des courants en *quadrature avec la f. é. m. aux bornes* de l'alternateur. On démontre, et nous l'admettrons, que le champ résultant se maintient constamment *en retard* d'un quart de période sur la *f. é. m. créée* par l'alternateur; ce champ tourne donc avec une fréquence égale à celle des courants alternatifs qui servent à l'alimentation des inducteurs de l'excitatrice. Cela posé, nous allons montrer que cette machine particulière peut, grâce à deux dispositions toutes spéciales, engendrer le *courant continu* nécessaire à l'entretien des inducteurs de l'alternateur.

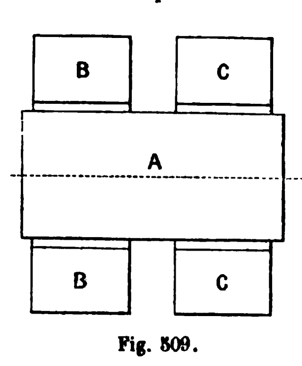


Fig. 509.

Considérons en effet :

1° Une dynamo à courant continu ordinaire (nous la prendrons bipolaire pour faciliter le raisonnement). Son induit tourne par rapport aux inducteurs et aux balais, qui sont fixes. Mais nous pouvons évidemment obtenir identiquement le même effet si nous entraînons en outre *toute* la machine dans un sens et avec une vitesse quelconques. Donnons en particulier à l'ensemble une vitesse égale et contraire à celle de l'induit; alors cet *induit ne tourne plus* dans l'espace, mais l'*inducteur* et les *balais se meuvent avec la vitesse égale et contraire* à celle de la partie qui d'abord tournait seule.

L'excitatrice *Hutin et Leblanc* telle que nous l'avons décrite sommairement réalise ce nouveau genre de dynamo à courant continu, en effet :

a) Le champ inducteur tourne (avec une vitesse égale à la fréquence n des courants alternatifs).

b) Nous pouvons laisser l'induit immobile.

c) Nous donnerons alors aux balais une vitesse n égale à celle du champ.

2° De ce premier type, nous pouvons passer à un autre identique :

a) Champ inducteur mobile, vitesse n.

b) Induit *mobile* également et dans le même sens, vitesse ω.

c) Balais mobiles avec une vitesse n relativement à l'induit, soit de $n - \omega$ dans l'espace.

3° Il s'agirait maintenant de modifier les données de cette excitatrice de façon à rendre les *balais fixes* comme dans une dynamo ordinaire. Pour cela on s'arrange de manière à :

a) Renverser d'abord ce sens de déplacement des balais par rapport à l'induit.

b) Modifier sa vitesse de façon à rendre le déplacement nul dans l'espace.

a) Pour renverser le sens de la rotation à donner aux balais, on fait usage d'un système spécial de connexions entre les sections de l'induit et les lames du collecteur. Représentons en effet (fig. 510) trois bobines consécutives avec les lames correspondantes du collecteur; les connexions normales sont représentées en pointillé mais dans le cas qui nous occupe, celles que l'on effectue sont toutes différentes. Considérons en effet dans ce collecteur de machine bipolaire un diamètre xy fixe et substituons à toutes les liaisons d'autres symétriques par rapport à ce diamètre : les nouvelles connexions sont alors figurées par des traits pleins, alors le mouvement des balais doit être inversé sans changer de vitesse, si nous voulons rester dans les conditions primitives. Evidemment, si la machine avait un certain nombre de lignes de pôles, il faudrait adopter un égal nombre de diamètres de symétrie.

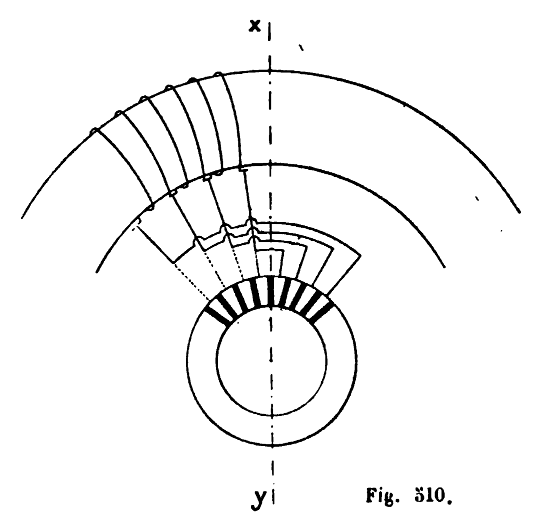


Fig. 510.

Avec cette première modification, notre excitatrice est ainsi constituée :

Champs inducteurs mobiles dans un sens ;

Induit mobile dans le même sens;

Balais mobiles dans le sens opposé.

b) Faisons varier maintenant la vitesse des balais et pour cela, changeons le nombre des lames du collecteur. Si notre machine a 2N pôles, soit N lignes de pôles, nous avons ordinairement au collecteur des groupes de N lames en parallèle. Si nous réduisons ce nombre de N à 1, nous devons multiplier la vitesse de rotation des balais par N et pour K lignes de balais, c'est-à-dire K lames en parallèle, la vitesse des balais sera celle du champ multipliée par $\frac{N}{K}$.

Cherchons maintenant une condition capable d'annuler la vitesse des balais.



Si n est la fréquence des courants alternatifs et N le nombre de lignes de pôles des stators, la vitesse de rotation du champ est dans l'espace

$$\frac{n}{N},$$

ou, *par rapport à l'induit* animé de vitesse ω

$$\frac{n}{N} - \omega.$$

Au lieu d'employer N lignes de balais, faisons usage de p lignes; la vitesse que doivent prendre les balais par rapport à l'induit est

$$\left(\frac{n}{N} - \omega\right)\frac{N}{K}$$

ou

$$\frac{n - N\omega}{K}$$

Ce *sens* doit être le *même* que celui du champ ou que celui de l'*induit*; mais l'emploi de *connexions inversées renverse ce sens* et alors si cette vitesse est égale à celle de l'induit, soit ω, les *balais* sont *immobiles dans l'espace*. La condition de fixité des balais est donc

$$\frac{n - N\omega}{K} = \omega$$

ou

$$N + K = \frac{n}{\omega}$$

Soit par exemple l'excitatrice de l'alternateur *Grammont* (600 kilovolts-ampères) : $n = 50$; $N = 3$; $K = 6$. On peut déduire de ces chiffres la vitesse qu'il convient de donner à l'induit. On a en effet

$$\omega = \frac{n}{N + K} = \frac{50}{3 + 6} = 5{,}55 \text{ tours par seconde.}$$

Le moteur qui entraîne l'alternateur devra donc attaquer l'excitatrice avec la vitesse que nous venons de calculer, laquelle est intimement liée à la vitesse de la partie principale : la commande se fait ordinairement par engrenages.

Quant à la constance du voltage aux bornes de l'alternateur, nous ne la démontrerons pas; nous nous contenterons de l'admettre en considérant que l'inducteur de l'excitatrice reçoit dans l'un des deux stators un courant invariable et dans l'autre un courant variable, égal au débit demandé.

Le système *Boucherot* (alternateurs *Bréguet*) consiste à faire usage d'une excita-

trice spéciale dite à *enroulements sinusoïdaux*. Son inducteur fixe est bobiné encore comme un stator de moteur à champ tournant. Quant à l'induit, qui tourne à l'intérieur de l'inducteur, il est constitué par une couronne munie de deux ou trois enroulements convenablement répartis. Considérons en particulier un enroulement double; entre deux touches consécutives du collecteur sont mises en série deux sections S et S′ : la première S distante de l'angle φ de la ligne de balais, reçoit un nombre de spires égal à

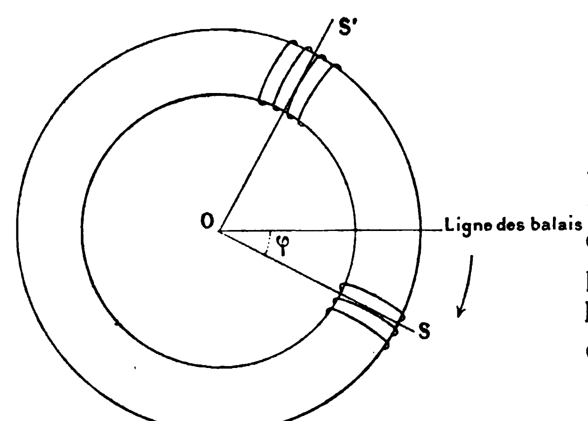


Fig. 511.

$$A \cos K \varphi$$

La seconde S′, en retard de 90° sur la précédente, est formée d'un nombre de spires donné par

$$A \sin K \varphi$$

A et K étant deux quantités constantes. Avec cette disposition, le calcul montre que, pour des valeurs convenables de la vitesse de rotation de l'induit par rapport à celle du champ et des constantes A et K, on obtient, entre les balais de la machine, du courant continu capable d'alimenter les inducteurs de l'alternateur. Quant au procédé employé pour obtenir le *compoundage*, il consiste essentiellement en un *transformateur* spécial dont le rôle est de *survolter* les courants inducteurs de l'excitatrice. La figure 512 donne le schéma de ce transformateur pour le cas de courants triphasés : les

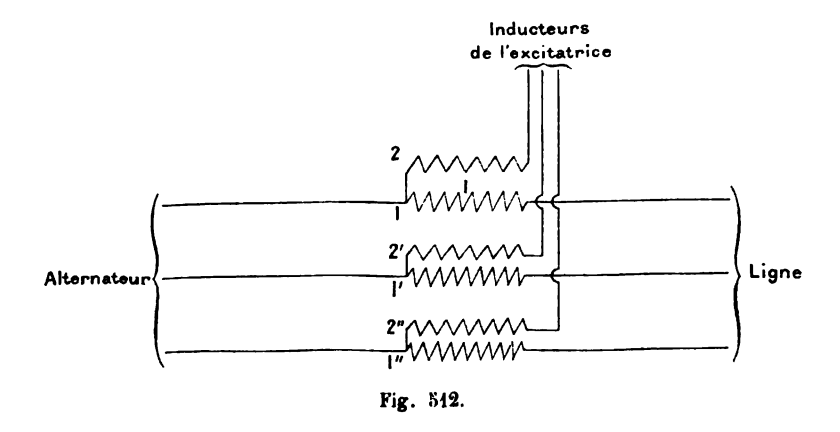


Fig. 512.

trois circuits primaires 1, 1′, 1″, sont branchés en série sur les fils de ligne de l'alter-

nateur; quant aux secondaires 2, 2', 2'', ils sont intercalés entre l'induit de l'alternateur et l'inducteur de l'excitatrice.

En résumé, si l'on examine ces deux moyens, on voit que le *compoundage* des alternateurs est obtenu au prix d'une certaine complication de la machine ou de ses accessoires. Il s'agirait de rechercher si les avantages obtenus justifient cette modification. Ces avantages sont au nombre de deux principaux :

1° Facilité de maintenir en synchronisme deux alternateurs *compounds* couplés en parallèle;

2° Dans les alternateurs ordinaires, l'excitation doit être suffisante pour réduire à 10 ou 15 0/0 la chute de tension aux bornes pour les régimes extrêmes; si au contraire, on adopte un procédé de *compoundage*, on peut laisser la chute de tension en charge atteindre 40 ou 50 0/0 à excitation constante et charger le système compoundeur de compenser cette chute. Ainsi, les ampères-tours inducteurs sont sensiblement diminués et il en est de même des dimensions de l'alternateur. On remarque en effet qu'à puissance égale les alternateurs compounds sont de grandeur notablement inférieure à celle des alternateurs à excitation constante.

CHAPITRE VII

ETUDE DU FONCTIONNEMENT DES ALTERNATEURS

Ce qui a été vu (page 411) au sujet des *moteurs destinés à actionner les dynamos* s'applique sans modifications au cas des *alternateurs*. L'installation se fait suivant les mêmes principes pour les deux ordres de machines.

Mise en marche de l'alternateur. — La machine étant en place, il est bon, si elle tourne pour la première fois, de la faire fonctionner à vide quelque temps pour s'assurer de l'intégrité de la partie mécanique.

Lorsqu'il s'agit de la mettre en service, on l'amène à sa vitesse normale puis on règle l'excitation, qui ordinairement est indépendante de l'alternateur, jusqu'à ce qu'on atteigne le voltage efficace voulu.

Le circuit ou les circuits principaux sont ensuite fermés et la charge introduite graduellement en agissant sur les appareils régulateurs comme il le sera dit ci-après.

Arrêt de l'alternateur. — Généralement on se borne à agir sur le moteur.

Régulation du courant. — Elle peut être obtenue par un certain nombre de moyens que l'on ramène aux suivants :

1° *Par l'excitation.* Il s'agit alors d'introduire dans le circuit de la machine excitatrice, ou d'en retirer suivant les cas, des résistances appropriées. Quelquefois au lieu d'agir sur le courant destiné aux inducteurs de l'alternateur, on opère sur le circuit inducteur de l'excitatrice elle-même si cette dernière machine est *en dérivation*, et la consommation d'énergie dans les rhéostats se trouve ainsi réduite. Cette introduction de résistances peut se faire d'ailleurs soit *à la main*, d'après les indications des appareils de mesure du tableau, soit *automatiquement*. Le régulateur *Blathy* est repré-

senté schématiquement (fig. 513); il est constitué par un rhéostat fixe divisé en un certain nombre de sections; chaque entre-section présente un fil tel que 1, 2, 3, etc., et ces conducteurs ont leurs extrémités échelonnées; ils peuvent plonger, en nombre variable, dans une coupe C remplie de mercure et fixée à l'extrémité supérieure d'un noyau de fer F équilibré par un flotteur. Autour du métal magnétique est formée une bobine alimentée par une dérivation prise sur la distribution que l'on veut régler et l'attraction qui en résulte tend à faire descendre la coupe. Dans ces conditions, les premiers fils 1, 2, 3 cessent d'être immergés dans le mercure et les sections correspondantes du rhéostat entrent dans le circuit d'excitation; les autres restent en court-circuit par le liquide conducteur. On comprend donc la possibilité de maintenir au courant une constance voulue.

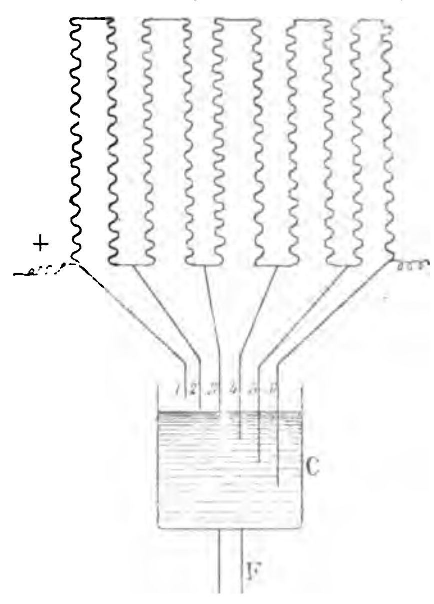


Fig. 513.

2° *Par une bobine de self.* Cette bobine, qui est une sorte d'électro-aimant, reste sur le circuit principal. Sa résistance ohmique est invariable mais on peut à volonté modifier sa réactance, et par suite son impédance, par l'introduction d'un noyau de fer. Cette opération se fait d'ailleurs encore soit à la main, soit automatiquement et l'on arrive ainsi au réglage. Ces bobines portent souvent le nom de *bobines de réactance.*

Ce moyen de régulation présente l'avantage de ne pas consommer d'énergie bien sensible.

3° *Le compoundage des alternateurs*, dont on a dit un mot précédemment, permet d'arriver au même résultat. On compounde d'ailleurs encore en faisant passer le courant principal dans le primaire d'un transformateur; aux bornes du secondaire, on recueille un courant alternatif de tension réduite et d'intensité proportionnelle au débit de l'alternateur. Ce courant est *redressé* puis employé pour renforcer les inducteurs.

Accidents qui peuvent survenir. — Ils sont assez nombreux et, comme dans le cas des dynamos continues, nous pouvons considérer les principaux que voici :

1° L'alternateur ne débite pas;

2° Tension insuffisante;

3° Etincelles aux bagues;

4° Echauffement anormal, bruits.

1° *L'alternateur ne débite pas.* Il est bon alors de porter immédiatement son attention du côté de l'excitation.

2° *Si la tension est insuffisante*, rechercher s'il n'existe pas un court-circuit. Il faut remarquer qu'ici l'existence d'un court-circuit est moins dangereuse que dans une dynamo à cause de la grande valeur de la self-induction ordinairement.

3° *Des étincelles aux bagues* accusent un mauvais contact entre les balais et ces bagues ou encore l'état défectueux de ces pièces frottantes.

4° *Un échauffement anormal*, s'il n'est pas dû à un court-circuit accidentel, peut provenir de causes mécaniques souvent graves qu'il faut immédiatement rechercher, et il est alors accompagné de bruits ou de trépidations.



NEUVIÈME PARTIE

DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ

CHAPITRE PREMIER

PRELIMINAIRES

Objet d'une distribution. — Il s'agit de répartir le courant produit par une série d'unités comprenant chacune un moteur mécanique et une dynamo entre un nombre plus ou moins grand d'appareils de réception constitués par des lampes, des moteurs, des cuves à actions chimiques, des appareils thermiques, etc.

En général chaque récepteur demande le courant en quantité déterminée et sous une tension donnée et on ne peut y satisfaire d'une façon rigoureuse; on s'arrange ordinairement de manière à donner à tous les récepteurs soit le même voltage soit la même intensité en modifiant l'autre facteur de la façon convenable. Ainsi, par exemple, soit une distribution à 110 volts; un moteur demande 1.500 watts; nous devrons lui donner l'intensité

$$I = \frac{1.500}{110} = 13,63 \text{ ampères.}$$

Nature des conducteurs. — Autant que possible on fait usage du cuivre pour la construction des fils ou des câbles. Ce métal est, en effet, le meilleur conducteur usuel de l'électricité mais il présente cependant un inconvénient pour les lignes aériennes

car il résiste assez mal à la traction, 30 à 40 kilogrammes par millimètre carré, et on ne peut donner au conducteur une grande portée. On remplace quelquefois, pour cette raison, le cuivre par des bronzes phosphoreux ou siliceux, corps très tenaces dont la conductibilité atteint les 98 centièmes de celle du cuivre. L'aluminium tend à être aussi employé surtout en Amérique. Sa conductivité n'est que les 60 centièmes de celle du cuivre mais sa grande légèreté permet d'espacer davantage les poteaux qui supportent la ligne.

On a aussi imaginé les fils composés à âme d'acier entourée de cuivre (fils bimétalliques Martin). La dilatation n'exerce, sur cet assemblage des deux métaux, aucun effet nuisible.

Suivant la section nécessaire, le conducteur est unique ou formé d'un câble de fils cordés.

Quelquefois les fils sont nus mais le plus souvent on les isole soit par un guipage de coton ou de soie en une ou plusieurs couches, pour les isolements très légers, soit par un ruban de caoutchouc pur sur lequel s'applique une couche de caoutchouc vulcanisé puis un ruban de fil et un second caoutchouc vulcanisé. Une enveloppe de tresse ou de ruban enduit de matière isolante recouvre le tout.

Pour les conducteurs destinés aux courants alternatifs, on doit prendre des précautions spéciales à cause de l'induction qui se fait sentir dans toutes les masses conductrices voisines des câbles ; on évite cet inconvénient en rapprochant les deux fils, celui d'aller et celui de retour. Alors les effets produits par les deux conducteurs sont inverses et par conséquent se détruisent. On prend quelquefois deux câbles concentriques et bien séparés l'un de l'autre au point de vue électrique. Cette méthode présente, en plus de ce que l'on désire, l'avantage de rendre impossibles, les accidents qui pourraient se produire si l'on touchait à la fois les deux fils.

Lignes aériennes. — Le conducteur peut être un fil unique quand le diamètre ne doit pas dépasser 10 millimètres. Pour des dimensions supérieures, on fait usage de *torons* formés d'un fil central *rectiligne* autour duquel se placent des couches successives de 6, puis 12, puis 18, etc. fils semblables tordus alternativement en sens inverse. Ces conducteurs séparés ont généralement les diamètres 11/10 (de millimètre), 20/10, 25/10, 30/10, etc.

Les fils simples ou les câbles sont soutenus de distance en distance par des isolateurs, doubles cloches en porcelaine destinées à empêcher la communication avec le sol, par l'intermédiaire de l'eau de l'atmosphère. Ces cloches sont elles-mêmes fixées soit sur des poteaux de sapin plantés dans la terre, soit sur des potelets assujettis aux murailles, soit enfin sur des herses ancrées aux fermes des toitures. Les portées sont variables ; elles dépendent du poids du conducteur (en chiffre rond $9s$ kilos par kilomètre, si $s =$ section en millimètres carrés pour *conducteur unique*, et $10s$ kilos pour câble à cause du raccourcissement dû à la torsion) et des surcharges accidentelles : neige, givre, action du vent, etc.

Dans certaines installations, et dans le but de diminuer le nombre des supports, on a eu l'idée de tendre un fil *d'acier* à grande portée et de suspendre le conducteur à ce fil par des attaches isolantes.

Lignes souterraines. — On dispose les conducteurs de diverses manières :

1° Ils sont *nus* et reposent sur des isolateurs placés de distance en distance le long de caniveaux bien cimentés munis de regards par lesquels on peut tirer les câbles, faire les réparations et les dérivations. Ces canaux communiquent ordinairement avec les égouts de manière à assurer l'écoulement des eaux qui pourraient s'y accumuler.

Ce mode est actuellement peu répandu sauf pour les tramways. On a employé quelquefois, dans ce système, des *bandes* ou *rubans* de cuivre, mais ces conducteurs manquent de souplesse et nécessitent un grand nombre de raccords car ces barres ne peuvent être fabriquées que sur des longueurs très limitées.

2° Le plus souvent on fait usage de conducteurs isolés placés en caniveaux soit de ciment soit d'asphalte ou encore dans des tubes de fer ou de poterie. Des puits donnent encore accès à ce canal et permettent le tirage de nouveaux câbles et la prise de dérivations.

3° Enfin le câble bien isolé peut être entouré d'une armature en fils de fer ou en plomb; il est ensuite simplement enterré. Mais il est bon de revêtir ces *câbles armés* d'un ruban de jute goudronné pour prévenir l'oxydation et l'action chimique des substances du sol. Ce mode est économique au point de vue de l'installation mais la moindre réparation ou un simple raccord nécessite une tranchée.

Jamais on ne fait usage de conducteurs souterrains pour des tensions élevées, dépassant 5.000 volts.

Section des conducteurs. — Il y a trois conditions qui règlent ce calcul de la section des conducteurs :

1° *Question d'économie :* prix du câble et consommation d'énergie dans la ligne. Il y a là deux facteurs opposés; en effet, un conducteur de faible section, de prix moins élevé, absorbe beaucoup plus d'énergie qu'un fil plus gros. La perte étant $R I^2$ sera bien plus petite, avec un même câble, si nous diminuons l'intensité I. Nous pouvons compenser cette décroissance par un excès de tension. L'avantage économique est donc aux courants de haut voltage.

2° Le *dégagement de chaleur* se traduit par une élévation de la température du conducteur. Cet échauffement ne doit pas dépasser une certaine valeur si on veut éviter la diminution de solidité du fil et la détérioration de l'isolant. On admet généralement, comme maximum de densité, une intensité de 1 à 2 ampères par millimètre carré s'il s'agit d'un fil aérien isolé. Pour un fil souterrain on adopte les intensités 1,5 à 2,5. Les fils nus peuvent d'ailleurs supporter sans danger des courants un peu plus intenses.



3° Il y a une dernière considération qui tend à accroître la section des conducteurs : la résistance de cette partie entraîne une *chute de potentiel* proportionnelle à la valeur de cette résistance. Or, bien des appareils d'utilisation de l'électricité ne peuvent admettre une tolérance supérieure à 2 ou 3 °/₀ de la tension. Il en résulte l'obligation d'accroitre le diamètre des conducteurs. Ainsi, par exemple, si le fil a 5 millimètres de diamètre, un courant de 10 ampères y subit une chute de tension de 9,1 volts par kilomètre.

C'est en combinant les trois conditions énumérées, en tenant compte des prix du métal et de la force motrice, que l'on fixe la section des conducteurs en adoptant ordinairement une formule connue sous le nom de *règle de Kelvin*.

Isolement de la canalisation. — On appelle *résistance d'isolement* d'une canalisation la résistance comprise entre le conducteur et la terre. Cette grandeur se mesure par différents moyens : on peut isoler le câble à une extrémité A et le relier par l'autre bout, en B, par l'intermédiaire du galvanomètre G, à une source P mise au sol. Le courant qui traverse l'instrument permet de calculer la résistance comprise entre le point A et le sol, mais il y a aussi à tenir compte de la charge du câble qui agit comme condensateur. Ce courant de charge est variable avec le temps et on convient de faire l'observation du galvanomètre après une minute d'expérience. Les nombres évalués ainsi sont plus concordants que si on faisait la lecture immédiatement.

A B G P

Fig. 514.

Ordinairement, la résistance d'isolement est fixée d'avance; le nombre voulu est considérable : plusieurs centaines de mégohms par kilomètre de ligne et en plus 25 mégohms par 100 volts.

Une résistance aussi grande n'est pas à la rigueur nécessaire. La perte de courant qui en résulte est inappréciable et elle le serait encore si l'isolement était moins bon; mais on veut, en exigeant une telle résistance, obliger les constructeurs à employer des isolants en quelque sorte parfaits de manière qu'on n'ait pas à redouter les pertes, même si les matières se modifient un peu avec le temps.

Cette méthode de détermination exige évidemment l'arrêt de la distribution. On lui préfère souvent des procédés permettant d'opérer sur la canalisation *en charge*. Indiquons d'abord comment on peut, à l'usine, être averti d'une *mise à la terre*; on fait usage *d'indicateurs de terre*. L'un des plus simples consiste en une *série* de deux lampes *a* et *b* (fig. 515), d'un voltage E égal à celui de la canalisation. En temps ordinaire ces deux lampes, alimentées chacune au voltage $\frac{E}{2}$, ne donnent qu'une lueur

légère. Entre elles est branchée une sonnerie S réunie d'autre part à la terre. On comprend aisément le fonctionnement de cet indicateur : si, par exemple, le fil A est à la terre, un circuit se ferme sur la lampe *b* et sur la sonnerie ; cette dernière fonctionne et la lampe *b* est rendue brillante.

Fig. 515.

La perte étant ainsi signalée, il est possible d'évaluer la résistance d'isolement du point défectueux, soit R, et pour cela on peut faire usage d'un voltmètre que l'on place successivement dans les trois positions suivantes :

1° Entre les deux origines des conducteurs (position 1, fig. 516) lesquelles sont aux potentiels V et V' (V>V'). Le voltmètre accuse alors une tension

$$(1) \qquad e_1 = V - V'$$

2° Entre V d'une part et la terre de l'autre (2). Le circuit de l'appareil de mesure est alors constitué, en partant du point V, par le voltmètre, la terre et le défaut, de résistance R, pour aboutir au point défectueux *v*, dont le potentiel est égal à *v*. Si on désigne par *r* la résistance de la bobine voltmétrique, on voit que le courant reçu dans l'appareil est

$$i = \frac{V - v}{R + r}$$

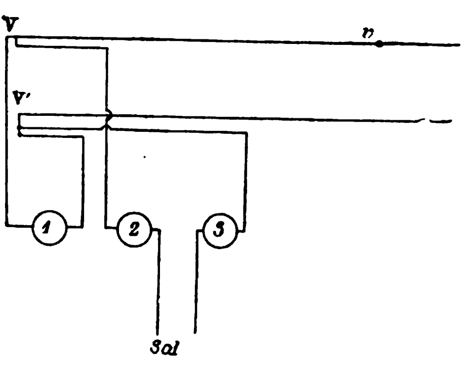


Fig. 516.

d'où un voltage indiqué

$$(2) \qquad e_2 = ir = \frac{V - v}{R + r} \times r$$

3° Enfin entre V' et la terre (3). Etant donné que le potentiel *v* est supérieur à V' nous renversons les attaches au voltmètre comme l'indique la figure, d'où un voltage accusé

$$(3) \qquad e_3 = \frac{v - V'}{R + r} \times r$$

L'élimination de *v* entre les équations (2) et (3) nous conduit à

$$\left(\frac{R + r}{r}\right)(e_2 + e_3) = V - V'$$

ou, d'après (1)

$$\left(\frac{R + r}{r}\right)(e_2 + e_3) = e_1$$

Nous en tirons

$$R = \frac{e_1 r}{e_2 + e_3} - r$$

Il reste enfin à *localiser* la perte. Il y a pour cela diverses manières d'opérer : le plus souvent, on sépare du réseau et d'une façon successive les divers tronçons de la ligne et on répète l'essai de la sonnerie. Dès que la partie défectueuse est trouvée, on opère de même de proche en proche jusqu'à ce qu'on arrive au point en défaut.

On peut encore si l'on veut trouver rapidement une terre signalée sur l'un des fils, mettre l'autre au sol par un plomb fusible très fin d'abord. Ce plomb fond sous l'action du court-circuit ainsi établi et on le remplace par d'autres de plus en plus gros jusqu'à ce que ce fil résiste. Cette persistance du plomb prouve que le courant de perte a fait sauter un autre fusible, celui qui protégeait le branchement défectueux ; il est alors facile de trouver rapidement le point à réparer.

CHAPITRE II

STATIONS CENTRALES. — GROUPEMENT DES UNITÉS

But des stations centrales. — Il consiste à distribuer l'énergie électrique, à un certain nombre d'abonnés répartis dans une ville ou dans une région, pour des usages variés : lumière, force motrice, chauffage, etc.

Force motrice utilisée. — La plupart des grandes usines utilisent la vapeur comme force motrice. Cependant il existe des stations centrales très importantes empruntant la puissance hydraulique. Parmi ces dernières il faut citer celle des chutes du Niagara. On estime à sept millions de chevaux-vapeur la puissance totale de cette chute et on compte en utiliser plusieurs centaines de mille. Sur la rive américaine, par exemple, un canal, débouchant dans le Niagara (rivière) à 2.400 mètres en amont de la chute, a été construit ; des fosses pratiquées dans ce canal amènent aux turbines l'eau qui s'écoule ensuite par un tunnel de décharge. Chaque turbine est de 5.000 chevaux et reliée à son alternateur par un arbre vertical de 45 mètres de longueur.

Des barrages établis sur certains cours d'eau conduisent au même résultat.

On fait encore entre deux points d'un même fleuve ou d'une rivière un canal de dérivation qui permet ainsi de disposer d'une certaine hauteur de chute. En particulier le canal de Jonage, près Lyon, réunit deux points du Rhône entre lesquels ce fleuve se partage en un grand nombre de bras sinueux. La hauteur de chute est de 12 mètres environ.

Un canal construit entre deux cours d'eau permet encore l'utilisation d'une certaine somme d'énergie. Prenons comme exemple le fleuve Saint-Laurent et l'un de ses affluents, le Grass River, deux cours d'eau qui s'approchent à une petite distance, 12 kilomètres environ avant leur confluent. Leurs pentes sont très différentes : alors que celle du Saint-Laurent est de $2^{m},50$ par kilomètre, on compte $1^{m},25$ dans le Grass River. Une dérivation entre les deux cours crée donc une différence de niveau égale à

$$12\ (2{,}50 - 1{,}25) = 15 \text{ mètres.}$$

Avec un débit de 450 mètres cubes par seconde, nous trouvons une puissance de

$$450.000 \times 15 = 6.750.000 \text{ kgm : seconde}$$

soit environ

100 000 chevaux-vapeur

Dans un certain nombre de cas les stations hydrauliques sont munies comme appareils de secours, de machines à vapeur.

Enfin citons encore les stations alimentées soit au gaz de ville, soit au gaz pauvre.

Facteurs caractéristiques des stations centrales. — Parmi tous ceux que l'on considère, nous distinguerons :

1° *La puissance moyenne de production.* C'est le rapport de l'énergie totale produite au nombre d'heures de marche. On la rapporte à la journée, au mois ou à l'année.

2° *Le coefficient d'utilisation.* On l'obtient en divisant l'énergie vendue par celle qu'aurait pu donner au maximum la station. La journée, le mois, l'année peuvent être pris pour base du calcul.

3° *Le coefficient de charge* est le rapport qui existe, à un moment donné, entre la puissance utilisée et la puissance totale. Quand l'éclairage est surtout le but de la distribution, ce facteur est extrêmement variable d'une heure à l'autre de la journée.

Classification des stations centrales. — Si nous considérons la nature des courants distribués, nous pouvons diviser les *Usines centrales* en quatre catégories :

1° Distributions par courant continu ;

2° Distributions par courants monophasés;

3° Distributions par courants polyphasés;

4° Distributions polymorphiques.

Cette dernière classe permet, comme nous le verrons, de livrer, grâce à la *transformation*, diverses formes de courants.

Remarquons d'abord que les distributions des trois premiers systèmes sont *directes* ou *indirectes*.

1° *Directes :* chaque récepteur reçoit *immédiatement* de la ligne le courant dont il a besoin;

2° *Indirectes :* le courant est reçu par un *transformateur* dont le rôle est alors de modifier les constantes de ce courant.

Objet du couplage des machines. — Ordinairement dans les *stations centrales* il y a plusieurs dynamos qui sont chacune commandées par un moteur séparé. On forme ainsi autant d'*unités* distinctes qu'il y a de dynamos.

La demande d'énergie varie en effet d'une heure à l'autre de la journée, et marcher

toujours avec la même machine serait chose peu économique. Le rendement à certains moments aurait une valeur très faible. On doit donc partager la production d'électricité entre plusieurs dynamos que l'on emploie suivant les besoins de façon que chaque unité travaille, autant que possible, à pleine charge.

Le problème se pose aussi bien pour les courants continus que pour les courants alternatifs.

Nous nous occuperons d'abord des premiers.

Modes de couplage des dynamos à courant continu. — Il y a deux modes principaux : en tension et en quantité.

1° On choisit le *groupement en tension* dans le cas des distributions *à intensité constante*. Suivant que les appareils en service sont en nombre plus ou moins grand, il faut atteindre un voltage variable. Quand une seule unité n'y suffit plus, on doit lui adjoindre un second groupe et ainsi de suite.

2° Le *couplage en quantité* est adopté dans les distributions *à potentiel constant*. La somme d'électricité demandée à la station varie. On ajoute les unités suivant les besoins et l'on adopte en ce cas surtout les excitations *dérivée* et *compound*.

Couplage en tension. — Le cas se présente notamment quand on désire alimenter une série d'arcs électriques tous disposés bout à bout. L'intensité nécessaire est toujours la même.

Nous pouvons examiner les procédés de groupement relatifs aux divers genres de dynamos : série, dérivation ou compound.

1° *Dynamo-série* : on opère absolument comme pour deux piles : le pôle + de la première machine est relié au pôle — de la seconde et l'on a deux pôles libres *b* et *a'* que l'on réunit aux barres collectrices *m n* et *m' n'* destinées à servir d'extrémités au circuit d'utilisation (fig. 517). On a soin de n'opérer la réunion des dynamos qu'au moment où les deux, fonctionnant séparément, donnent un même débit. (La première fournit déjà son courant à la distribution ; la seconde est reliée à un tableau de lampes ou à des résistances qui représentent un circuit artificiel).

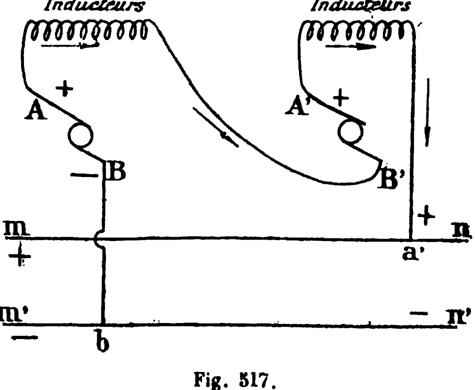


Fig. 517.

2° *Dynamos-shunts.* — La figure 518 montre les attaches à réaliser théoriquement : pôle — de la première dynamo réuni au + de la seconde. Mais le sens du courant dans l'un des inducteurs peut être renversé si la f. é. m. de la machine correspondante, celle de droite par exemple, s'abaisse suffisamment pour que son pôle — prenne un

potentiel supérieur à celui du pôle +; les pôles sont alors inversés et le courant pro-

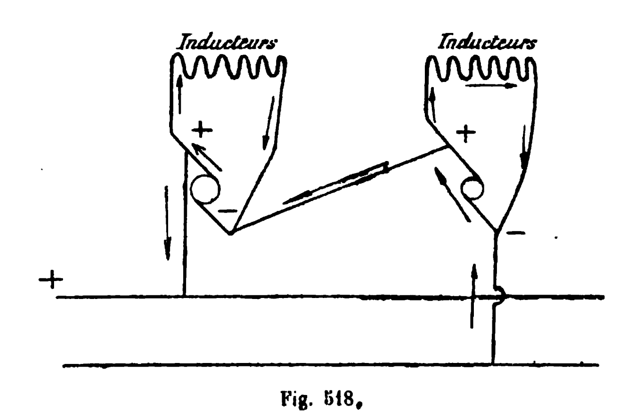


Fig. 518.

duit change de sens; dès lors, les deux machines, au lieu d'ajouter leurs tensions, tendent à se neutraliser mutuellement.

On évite facilement ce désagrément en réunissant en série d'une part les inducteurs et de l'autre les induits (fig. 519). Le courant conserve alors forcément son sens ordinaire dans les bobines.

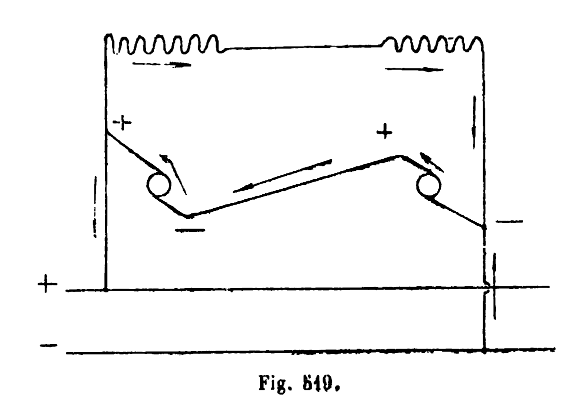


Fig. 519.

3° *Dynamos-compounds*. — La dynamo est l'association de deux machines; le couplage doit aussi être la combinaison des deux couplages précédents. Ce mode d'ailleurs ne présente pas d'intérêt.

Couplage en quantité. — C'est le plus souvent utilisé, les distributions se faisant généralement à potentiel constant et non à intensité invariable :

1° *Dynamos-série*. — Théoriquement, il faut relier les deux pôles + d'une part à l'un des fils de distribution, soit mn; les deux pôles — sont rattachés à l'autre conducteur $m'n'$ (fig. 520). On ne fait la connexion que quand la machine à introduire

dans le circuit marque le même voltage que celle qui est en service. Dans ce mode de

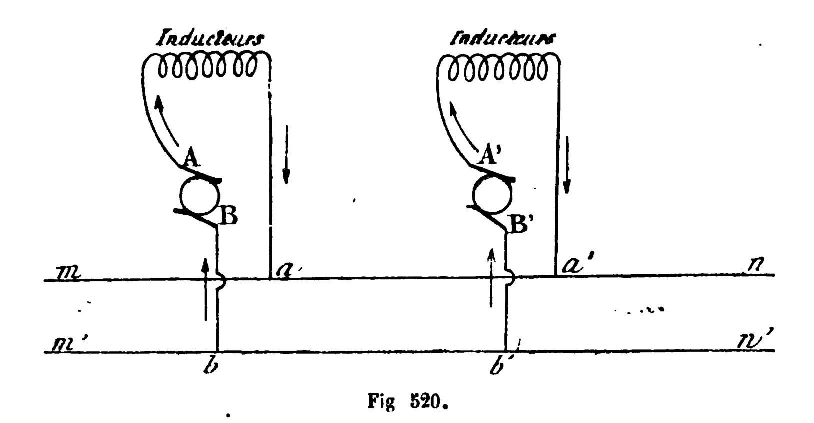


Fig 520.

couplage, il y a à craindre certains accidents; il peut se faire que l'une des machines, par une diminution de vitesse, ou pour toute autre cause, baisse de voltage; cette dynamo, au lieu de fournir de l'électricité à la distribution, en absorbe comme le ferait un moteur électrique. Mais alors ses pôles inducteurs sont inversés, ce qui contribue à accroître la *consommation* d'énergie dans cette machine, car dès lors le courant débité par la dynamo en défaut change de sens et annule celui de l'autre génératrice.

On empêche facilement ce renversement en réunissant par un fil A A′ peu résistant dit *de compensation* ou *d'équilibre* (fig. 521), les deux pôles semblables des dynamos. En marche normale, les deux points A et A′ sont au même potentiel et le courant ne circule pas dans le fil supplémentaire; mais si le voltage de la machine de droite vient à baisser, un courant s'établit de A à A′ et passe en sens contraire du sens normal dans l'induit de la machine affaiblie. Ce courant concorde avec le courant principal dans la dynamo de gauche. Il en résulte (voir plus loin « *Moteurs excités en série* ») que la première machine A′ B′ tend à tourner plus vite et la seconde plus lentement d'où le rétablissement de l'égalité des deux tensions.

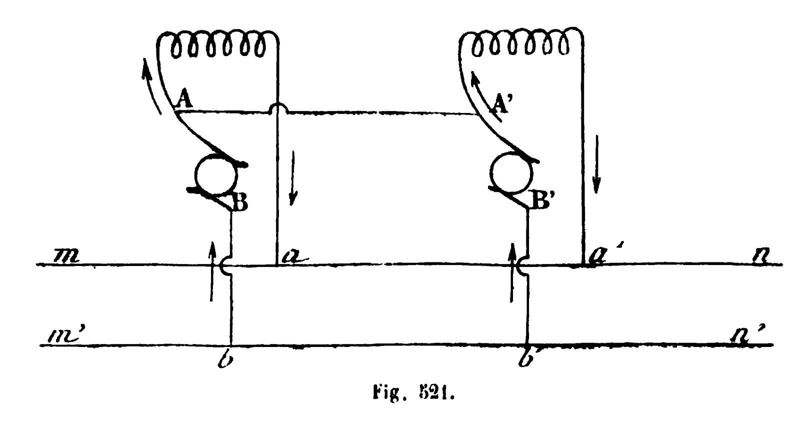


Fig. 521.

2° *Dynamos-shunts*. — Le problème qui va nous occuper maintenant est celui qui se pose dans la plupart des stations centrales (qui sont à *voltage constant*). Il ne présente d'ailleurs aucune difficulté théorique et la figure schématique 522 indique les connexions à établir.

Pratiquement chaque dynamo peut communiquer avec les deux barres collectrices $a\,a'$ et $b\,b'$ qui partent du tableau de distribution, par un interrupteur à deux pôles, et possède un voltmètre individuel. Si donc il s'agit d'adjoindre une nouvelle unité à une

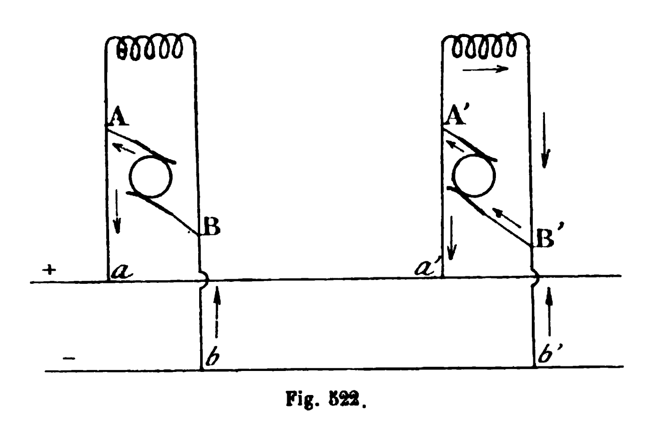


Fig. 522.

ou plusieurs machines travaillant déjà, on met la dynamo en marche; on attend qu'elle s'excite et on règle son voltage, au moyen de son rhéostat, jusqu'à ce que le voltmètre individuel marque le même chiffre que l'appareil général placé entre les barres $a a'$ et $b\,b'$. A ce moment, l'interrupteur bipolaire est manœuvré et la nouvelle machine entre en service.

Ce mode très simple de couplage ne présente qu'un inconvénient, la lenteur de l'amorcement; on l'évite quelquefois en prenant le circuit d'excitation non pas entre les bornes de la machine mais entre les deux barres collectrices comme le montre la figure 523.

Fig. 523.

3° *Dynamos compounds*. — Le couplage est la combinaison, dans ce cas, des deux modes qui viennent d'être exposés (machines série et machines à excitation dérivée) et il présente un intérêt considérable pour le cas des usines de

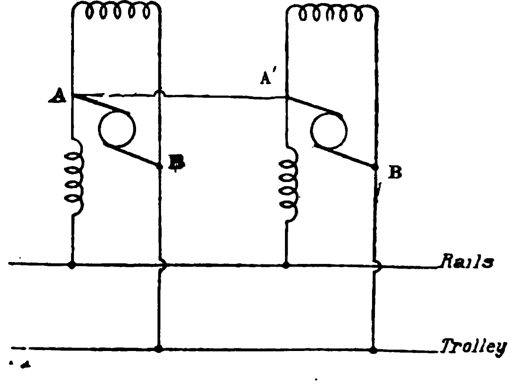


Fig. 524.

tramways électriques : on réunit donc, aux deux barres du tableau, les pôles + d'une part et les pôles — de l'autre (fig. 524). De plus, on établit un fil de *compensation* A A' entre les deux pôles A et A' qui ne sont pas déjà connectés. Ce sont d'ailleurs ces pôles que l'on relie aux rails.

Modes de couplage des alternateurs. — *A priori* les alternateurs, de même que les machines à courant continu, pourraient être groupés :

1° en tension;

2° en parallèle ou en quantité.

Impossibilité d'associer deux alternateurs en tension. — A l'exemple de ce que l'on fait dans le cas des générateurs à courant continu, nous devons réunir nos deux alternateurs par leurs pôles contraires, autrement dit les phases doivent être en concordance dans le circuit constitué par les deux induits. De plus, cette concordance doit persister tant que les machines restent couplées.

Supposons donc une telle association. Si les deux machines étaient entraînées par un même arbre rigide, leurs phases pourraient rester indéfiniment réglées mais ce n'est pas ce qui a lieu pratiquement : ou bien les moteurs sont complètement séparés, ou bien la transmission étant commune, chaque alternateur est entraîné par une courroie distincte et dans les deux cas un dérèglement est fatal. Soient alors, à un moment donné, en I et en II (fig. 525) les courbes représentant les deux f. é. m. (la première étant en avance sur la seconde). La f.é.m. résultante, dans le circuit, s'obtient en additionnant les ordonnées des deux courbes. Quant au *courant* résultant, il retarde sur cette f.é.m. (d'une quantité inférieure à un quart de phase) et il est représenté par la courbe marquée *Int. R.* Or, chaque alternateur fournit au circuit une puissance qui égale à chaque instant le produit : Int. × f. é. m. La figure 525 nous indique que ce produit est plus grand pour la machine II (en retard) que pour I (en avance). Dès lors, l'alternateur en retard doit diminuer de vitesse et par suite accentuer son retard. Cet effet continue jusqu'à ce qu'une différence d'une demi-période s'établisse entre les deux génératrices : la discordance est alors totale et les machines sont en opposition. Ainsi le couplage en tension ne peut être obtenu en général. Ce mode n'aurait d'ailleurs qu'un intérêt secondaire car l'emploi des transformateurs, permet, comme nous le verrons plus loin, d'élever à volonté la tension de ces courants.

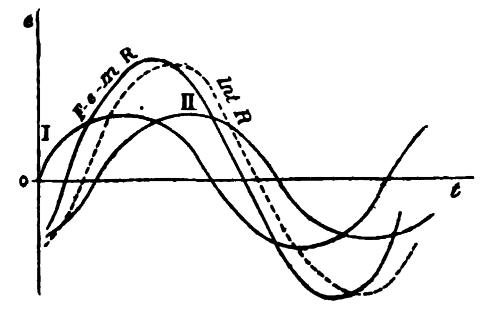


Fig. 525.

Alternateurs en parallèle. — Les machines tendant à se mettre d'elles-mêmes

en opposition, il est possible d'établir entre les deux points C et D un branchement sur lequel se placent tous les appareils d'utilisation : le couplage en parallèle est

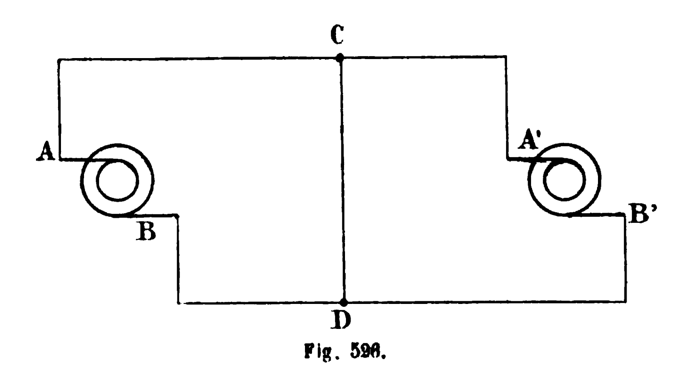


Fig. 526.

ainsi obtenu. Seulement cette opposition n'est pas immédiatement atteinte et il importe d'éviter aux appareils récepteurs cette période variable. Pour cela, on fait usage d'instruments spéciaux dits de *mise en phase* ou de *synchronisation*. Pour indiquer le procédé, distinguons le cas d'alternateurs à bas voltage des génératrices à haute tension.

Soient d'abord deux machines à bas voltage, 110 par exemple : elles sont excitées toutes deux à leur tension normale puis reliées entre elles par les fils AA' et BB'. Sur l'un de ces fils sont installées, en série, deux lampes à incandescence de 110 volts : ces deux lampes s'allument si les alternateurs sont en tension mais bientôt la différence de phase s'accentuant, on voit les lampes s'éteindre et accuser ainsi l'opposition. Cet instant est choisi pour relier les points C et D aux fils de la canalisation par le moyen d'interrupteurs convenables. Le couplage étant ainsi établi, les alternateurs vont conserver leur phase car si l'un avançait, la puissance qu'il fournirait à la canalisation augmenterait, d'où une tendance à un ralentissement de vitesse (par réaction sur le moteur ou par glissement de la courroie).

On ne pourrait bien entendu employer un tel appareil de synchronisation dans le cas de hautes tensions, mais il suffit alors de mettre une lampe sur le secondaire d'un transformateur dont le primaire est formé de deux bobines mises en dérivation chacune sur un des alternateurs à coupler : la lampe subit encore des fluctuations qui indiquent la concordance ou la discordance des deux unités. On peut donc encore maintenant effectuer la réunion de l'alternateur à la canalisation au moment où les phases concordent.

Généralement, quand divers alternateurs fonctionnent en parallèle, on répartit la charge également entre chacun en agissant sur les moteurs mécaniques (admission, dans le cas de machines à vapeur). De même pour retirer une génératrice du circuit, on diminue l'admission de vapeur et on attend, pour couper la communication électrique, que l'ampèremètre de l'alternateur soit descendu à zéro.

Tableau de distribution. — Il est destiné à effectuer toutes les manœuvres

nécessaires dans les usines centrales : connexions, réglage, couplage, etc. Le tableau est ordinairement formé par des panneaux de marbre blanc ou d'ardoise. Sur lui aboutissent tous les circuits : machines, lignes, accumulateurs, etc. Des commutateurs et des interrupteurs appropriés permettent d'effectuer toutes les liaisons voulues. La disposition du tableau est très variable d'une usine à une autre. Ordinairement dans une distribution à deux fils, il y a au tableau deux barres générales qui sont reliées aux extrémités de la ligne. Un voltmètre central indique, à chaque instant, la tension dans la canalisation. Chaque unité correspond à une portion de tableau et possède un voltmètre et un ampèremètre spéciaux. Ces circuits séparés sont reliés aux barres générales par des interrupteurs.

On voit encore sur les tableaux d'autres appareils de mesure tels que wattmètres, enregistreurs, etc., et des appareils de sécurité : plombs fusibles, disjoncteurs, parafoudres.

Prix de l'énergie produite par les stations centrales. — Les éléments qui permettent d'établir ce prix sont très variables ; ils dépendent du prix de la force motrice (première installation, entretien, etc.).

Voici quelques prix en usage, rapportés au kilowatt-heure :

Niagara	0f,015
Yverdon	0 ,10
Milan.	0 ,20
Genève	0 ,25
Lyon.	0 ,65
Paris.	0 ,90 à 1 ,20

Généralement le prix est moins élevé dans les stations hydrauliques mais le charbon, n'entre pas toujours pour une part aussi considérable qu'on pourrait le penser (de 3 à 20 centimes par kilowatt-heure). Lorsque le charbon n'est pas cher, l'économie des stations hydrauliques s'atténue en raison des frais énormes de premier établissement.

CHAPITRE III

DISTRIBUTION PAR COURANT CONTINU

Divers modes. — La *distribution directe* se fait de plusieurs manières :

a) Tous les appareils sont sur le même circuit : *distribution en série* ou *en tension* : on les alimente d'un courant d'*intensité constante*.

b) Tous sont sur des dérivations différentes : *distribution en dérivation*, avec une différence de potentiel invariable.

c) Plusieurs récepteurs forment des séries que l'on met en dérivation les unes par rapport aux autres : *groupement mixte*. A ce mode se rattachent des procédés très répandus : distribution *à trois* et *à cinq fils*.

Quant à la *distribution indirecte*, elle fait intervenir les *transformateurs rotatifs* et les *accumulateurs*.

Distribution en série. — Tous les appareils d'utilisation sont reliés entre eux de manière à former une chaîne dont les deux extrémités viennent aboutir aux deux pôles de la distribution A et B (fig. 527).

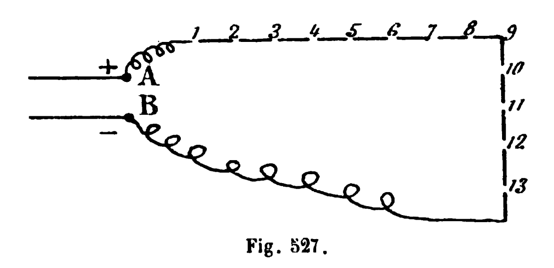


Fig. 527.

La même intensité est donc servie à tous les récepteurs; il faut des appareils pouvant s'accommoder de ce régime : ce mode de montage n'est applicable que dans une installation réglée pour *intensité* constante.

Voici les principales propriétés de cette distribution :

1° L'intensité constante, au point de vue du réglage, est moins avantageuse que le potentiel constant. On emploie souvent, pour ce montage, des dynamos en série.

On voit que l'intensité débitée par la machine, ou par le système de machines, est juste égale à celle que demande chaque récepteur;

2° Le voltage aux bornes est, sans tenir compte de la perte dans les fils, égal à la somme des différences de potentiel exigées par les divers appareils d'utilisation. Il doit donc atteindre une grande valeur dans certains cas. Cette valeur considérable présente un avantage et un inconvénient:

Avantage: La perte dans la ligne est faible, ce qui permet d'employer, même pour des distributions importantes, des fils de faible section.

Inconvénient: Communication possible avec la terre et perte d'énergie; dangers d'accidents.

3° Tous les récepteurs sont solidaires. C'est là un défaut capital; car si l'un cesse de fonctionner pour une cause quelconque, tous font de même; le circuit est rompu. On se voit donc obligé de pourvoir chaque instrument d'un dispositif le mettant en court-circuit s'il tombe en défaut. Cela complique un peu l'installation;

4° L'énergie perdue le long des conducteurs s'exprime, comme on le sait, par le produit RI^2. Les deux facteurs R et I sont constants et il en est de même de l'énergie consommée. Cette portion, comparée au travail total qu'engendre la distribution, donne un quotient variable: si tous les appareils fonctionnent, RI^2 n'est qu'une faible fraction de l'énergie totale. Au contraire (ce qui a lieu en plein jour pour certaines distributions de lumière), quand quelques récepteurs seulement sont en service, le rapport prend une plus grande valeur et on travaille dans de mauvaises conditions économiques. Dans tous les cas, on a intérêt, au point de vue de la consommation, à réduire le plus possible la résistance, ce qui conduit à augmenter la section des conducteurs.

Ce système utilisé aux Etats-Unis, n'est pas employé en France.

Distribution en dérivation. — De la station partent deux conducteurs AC et BD que l'on appelle *distributeurs* (fig. 528). Entre eux on établit, au moyen d'une ou

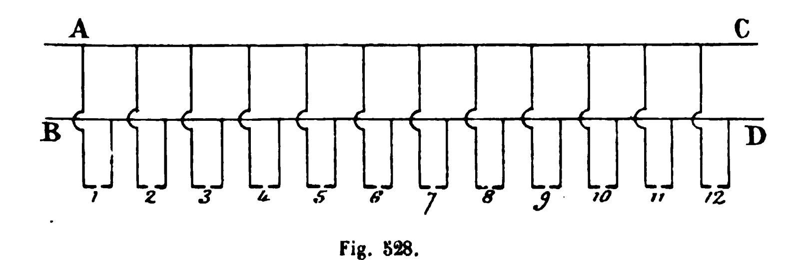


Fig. 528.

de plusieurs unités, une différence de potentiel déterminée. Quant à l'intensité du courant, elle est variable avec la demande d'électricité. On dispose entre les conducteurs



de la canalisation des fils appelés *branchements* et portant chacun un appareil récepteur tel que 1, 2, 3.

Propriétés : 1° Le voltage demandé aux machines égale, sauf les pertes dans la ligne, celui exigé par un appareil isolé. L'intensité, par contre, est la somme de toutes les intensités correspondant à chaque appareil;

2° Cette valeur, forcément considérable de l'intensité, est un inconvénient important; elle oblige à prendre de gros câbles si l'on ne veut pas perdre une trop grande fraction d'énergie dans la canalisation. On atténue d'ailleurs cette dépense par deux moyens :

a. On choisit des appareils à potentiel assez élevé ce qui permet de diminuer en proportion le débit et de réduire la perte due à une résistance donnée.

b. Les distributeurs n'ont pas une section constante. A l'origine de ces fils, vers les points A et B, la quantité d'électricité transportée est grande et, à chaque branchement, le courant diminue, de sorte qu'à l'extrémité de la ligne, il ne reste plus rien dans les câbles principaux. On forme quelquefois les distributeurs de plusieurs tronçons qui vont s'amincissant à mesure que l'on s'écarte du centre de distribution.

3° Le système donne l'indépendance parfaite à tous les appareils; l'un quelconque peut cesser de fonctionner, le courant n'en continue pas moins à traverser les autres; les appareils de réglage seuls ont à agir pour réduire le débit.

4° La perte d'énergie dans la ligne n'est plus constante; elle est RI^2 quantité variable avec I et d'autant plus petite que la consommation est plus faible.

5° La résistance des conducteurs amène une chute de potentiel le long de la ligne et il en résulte que tous les appareils d'utilisation ne fonctionnent pas également bien. Si par exemple il s'agit d'éclairage, toutes les lampes demandent exactement le même voltage; or celle qui est mise en 1 présente, entre ses bornes, une différence de niveau supérieure à celle qui se trouve en 12. Cette considération limite l'étendue de la zone de distribution.

Généralement la tension adoptée est de 110 volts; quelquefois elle est de 220.

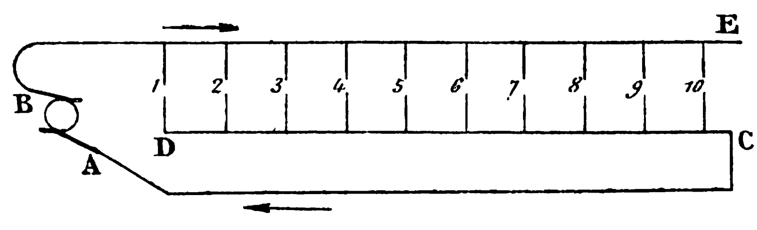


Fig. 529.

Par une dépense supplémentaire de fil, on peut d'ailleurs égaliser les potentiels aux bornes de tous les récepteurs : on fait usage du *montage en boucle*. Le distributeur A (fig. 529) va jusqu'à l'extrémité de la ligne à desservir puis se replie jusqu'en D parallèlement au deuxième fil BE. C'est alors entre CD et BE que l'on établit les branchements. On voit que le courant alimentant chacune des dérivations, 1 et 10 par exemple, parcourt exactement la même longueur de conducteur.

Le montage en boucle peut d'ailleurs ne pas demander de supplément de câble dans certains cas spéciaux. Supposons qu'il s'agisse de desservir une série de récepteurs disposés sur une ligne fermée telle que MIJKL (fig. 530). Ce serait le cas d'un groupe

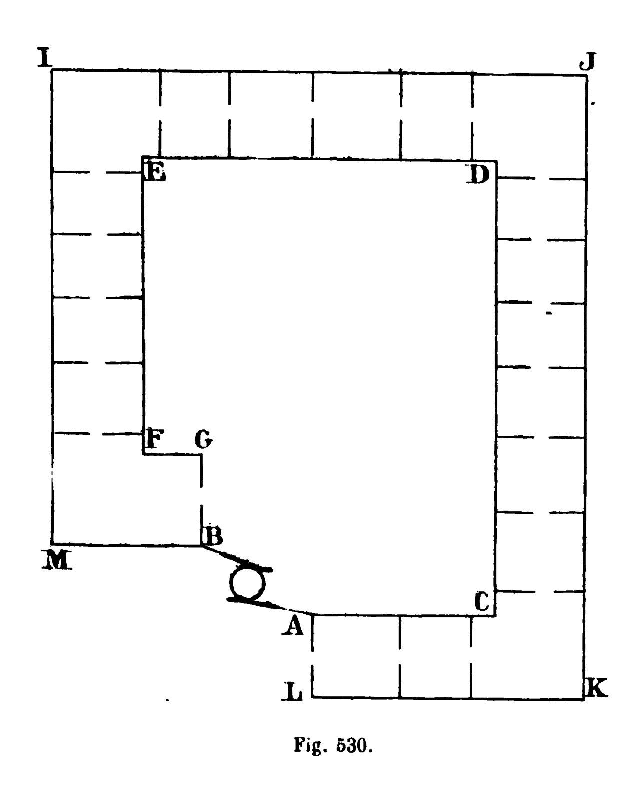


Fig. 530.

d'habitations formant un carré ou un rectangle. Un premier distributeur : ACDEF part d'un pôle de la distribution ; le second BMIJKL émane de l'autre pôle. Ces conducteurs ne se rejoignent pas et on place entre eux les branchements contenant les récepteurs.

Emploi des feeders. — Le mode primitif de distribution à potentiel constant ne permet pas de s'éloigner beaucoup de la station génératrice. On arrive à augmenter notablement la grandeur de la zone desservie en formant un réseau fermé dit *de distribution* dont les mailles suivent le tracé des rues et qui se raccordent aux croisements des voies. Le fil qui constitue le réseau est double ; on a tracé (fig. 531) plusieurs rues et une place desservies par le réseau, lequel est figuré par deux traits, l'un plein, l'autre pointillé. Ces deux circuits distincts doivent être maintenus à une différence de potentiel donnée ; on y arrive par l'emploi de fils partant de l'usine et nommés *feeders;* ces conducteurs se rendent en des points 1, 2, 3, 4, appelés *centres de distribution* ou *boîtes de jonction.*

Les circuits des abonnés sont greffés en *a a*. ... sur le réseau ; ils sont tous desservis

à la même tension. Souvent, dans le but de s'assurer que la différence de potentiel est constante sur tout le réseau, on fait usage de *fils pilotes* reliant les centres de distri-

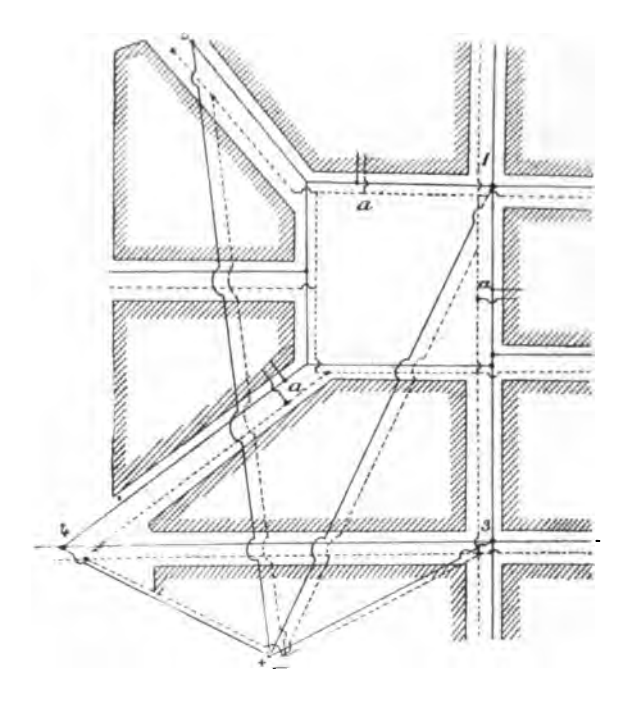


Fig. 531.

bution à des voltmètres situés à l'*Usine* et l'on peut agir en conséquence sur le réglage des machines.

La section totale des feeders est régie par la quantité d'électricité débitée ; on distribue donc les sections partielles de chacun de ces conducteurs d'après la consommation probable de courant autour des divers *centres*.

En réalité chaque feeder transporte une quantité d'électricité I qui n'est pas absolument celle que l'on avait prévue; il en résulte dans chacun une perte de tension

$$e = \mathrm{R\,I}$$

si R est la résistance du conducteur (aller et retour). Il s'agit donc, pour maintenir absolument invariable la tension aux divers points 1, 2, 3, etc., de régler séparément chacun des feeders. On y arrive de deux manières différentes :

1° Au moyen de *rhéostats* réglables d'après les indications de voltmètres reliés aux centres de distribution et placés sur chaque feeder ;

2° Par l'emploi de *survolteurs* ou *machines surélévatrices*. Supposons (fig. 532) deux feeders partant des barres ab et $a'b'$ du tableau, entre lesquelles est maintenue



une tension constante. Un moteur électrique **M** est monté en dérivation sur ces deux

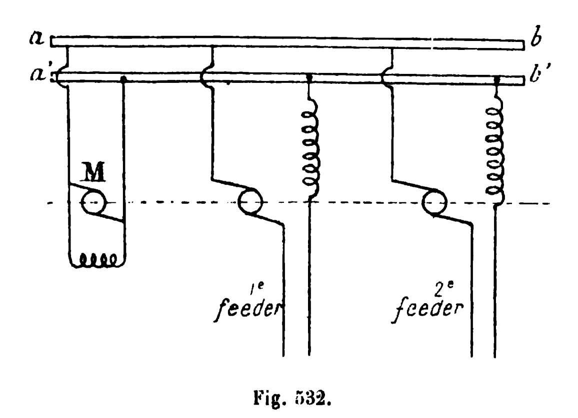


Fig. 532.

barres ; il tourne à vitesse constante et sur son arbre sont calées deux dynamos (une par feeder) excitées en série et placées sur le circuit de chacune des artères. On voit donc que l'excitation de ces machines croît avec l'intensité du courant dans chaque conducteur; il en est donc de même de la f. é. m. créée de sorte qu'on peut compenser la perte de tension dans chacune de ces lignes et maintenir invariable la différence de potentiel aux diverses boîtes de jonction.

Distribution mixte ordinaire. — On partage les récepteurs en plusieurs séries que l'on dispose en dérivation sur les conducteurs principaux (fig. 533). Chaque bran-

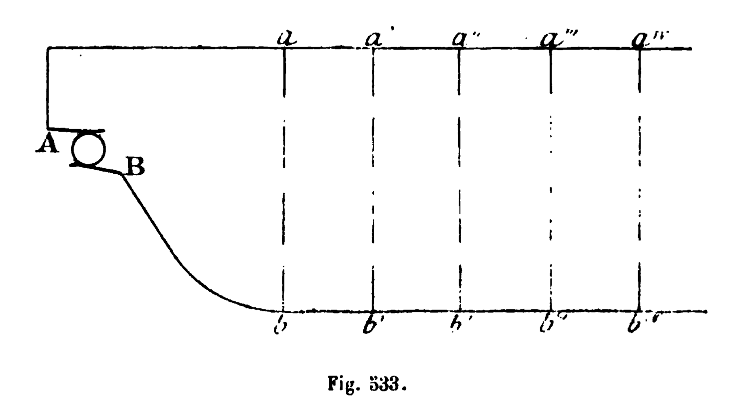


Fig. 533.

chement $a\,b$, $a'\,b'$ comprend dans cette figure trois appareils d'utilisation.

La méthode présente des avantages et des inconvénients :

Diminution de l'intensité dans les conducteurs de la canalisation d'où économie de cuivre;

Dépendance de tous les appareils d'un même branchement.

Distribution à trois fils. — On peut profiter d'ailleurs de l'avantage économique du système mixte en évitant la solidarité des récepteurs d'un branchement.

Pour cela on emploie deux dynamos reliées en tension (fig. 534). Des deux points

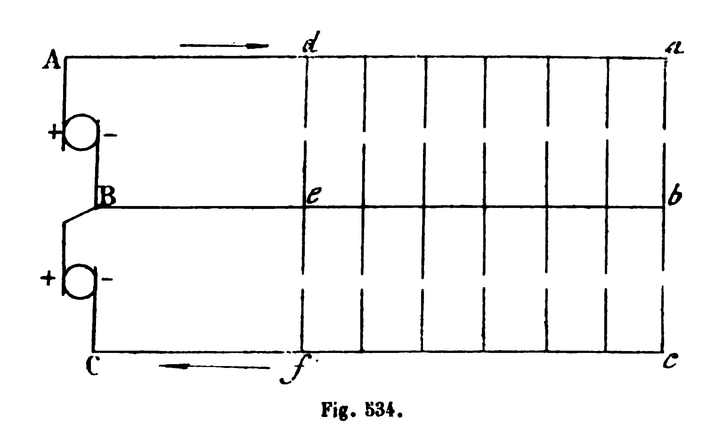


Fig. 534.

extrêmes A et C partent les conducteurs principaux A*a* et C*c*; un troisième fil B*b*, appelé *fil neutre* ou *fil de compensation*, est relié au point B. On a donc deux circuits distincts sur lesquels se montent les récepteurs, comme le montre la figure. Si, par exemple, on veut alimenter les appareils à 110 volts, on prend deux dynamos capables de produire environ 120 volts et l'on a sur chaque circuit le voltage demandé.

On voit quel est l'usage du troisième fil :

1° Si les deux *ponts* sont également chargés, le courant, parti de l'usine par le fil A*a*, y revient par le fil *c*C, et *b*B n'est traversé par aucune intensité.

2° Si les récepteurs sont plus nombreux sur *ab* que sur *bc*, le fil *b*B ramène à la *station* un courant d'intensité égale à la différence des intensités demandées par les deux ponts mais aucun appareil ne cesse d'être alimenté.

Les récepteurs sont donc bien tous indépendants les uns des autres.

L'économie du système ressort du raisonnement suivant :

1° Si nous avions à desservir en dérivation simple les mêmes récepteurs, l'intensité du courant exigé serait le double de celle que demande la distribution à trois fils (puisqu'ici les appareils sont par deux en tension). Donc pour une même perte d'énergie consentie dans les deux cas, nous pouvons réduire les sections des fils au quart de leur valeur. Il fallait donc, dans le cas d'une dérivation ordinaire :

Deux fils de section S, soit 2 S.

Il faut maintenant :

Deux fils de section $\frac{S}{4}$ soit $\frac{S}{2}$.

2° En distribuant convenablement les abonnés sur les deux ponts, on arrive à équilibrer à peu près les deux circuits. Alors le troisième fil n'est traversé que par un faible courant ; contentons-nous d'une section égale à la moitié de celle des conducteurs prin-



cipaux, soit $\frac{S}{8}$ et nous aurons une section totale pour nos trois fils

$$\frac{S}{2} + \frac{S}{8} = \frac{5\,S}{8}$$

L'économie réalisée est donc

$$2\,S - \frac{5\,S}{8} = \frac{11\,S}{8}$$

soit de

$$\frac{\frac{11\,S}{8}}{2\,S} = \frac{11}{16} = 68\ \%\ \text{environ}$$

Dans certains cas, on ne fait pas partir le fil neutre de la *station centrale*. Alors une dynamo unique se prête à la combinaison, mais il faut, pour établir l'équilibre entre les deux ponts, des appareils *compensateurs* ou machines *régulatrices*. Ce sont deux dynamos en dérivation montées sur un même axe et excitées (comme le montre la fig. 536 pour le système *à cinq fils*) par une dérivation prise sur les feeders ; les deux induits sont associés en tension et le fil neutre a pour origine le point de liaison de ces deux induits.

1° Supposons d'abord les deux ponts également chargés ; les deux dynamos tournent en absorbant très peu d'énergie à la canalisation et toutes deux tendent à conserver la même vitesse.

2° Si l'un des circuits est plus chargé que l'autre, l'excès de courant de ce pont traverse l'induit placé sur le second. Cet induit, comme moteur, accélère sa marche et entraîne avec lui l'induit du pont chargé qui fonctionne dès lors comme génératrice.

Il y a donc en quelque sorte *transfert* de l'énergie électrique d'un pont sur un autre.

Distribution à cinq fils. — On dispose quatre dynamos en tension et des deux extrémités de l'ensemble partent les fils principaux de la canalisation ; trois autres conducteurs B*b*, C*c*, D*d* (fig. 535) ont pour origines les points de réunion des machines. On forme ainsi quatre ponts sur lesquels se trouvent répartis tous les récepteurs.

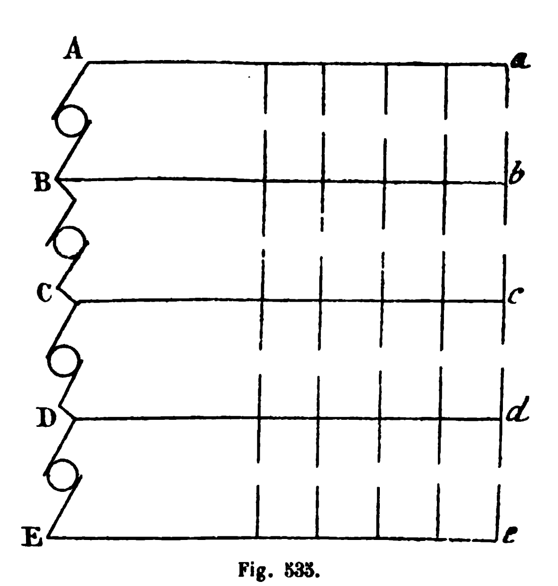


Fig. 535.

L'économie réalisée dans ce système est encore plus sensible que dans la distribution à trois fils. Ce procédé permet d'étendre la zone desservie par l'Usine.

On peut d'ailleurs ne faire partir de la

station que les conducteurs principaux et une seule dynamo de voltage quadruple de celui des précédentes suffit alors. Mais il faut équilibrer la tension sur chacun des quatre ponts. On y arrive par les *compensateurs* ou *dynamos régulatrices* représentées schématiquement (fig. 536). Ces machines sont quadruples et montées sur un

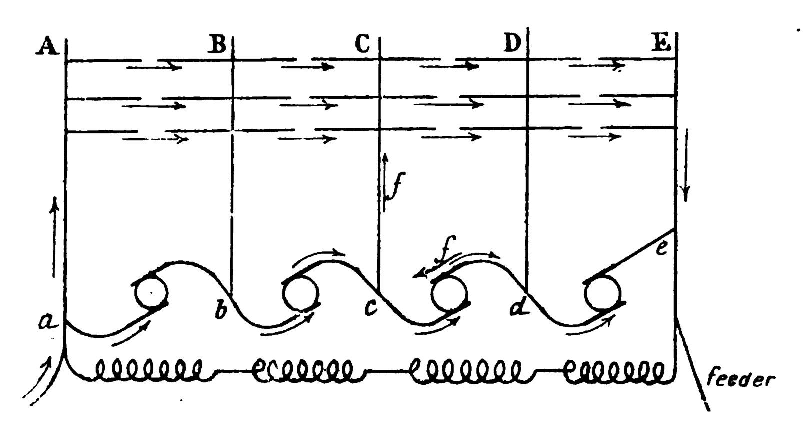


Fig. 536.

même arbre; leurs quatre inducteurs en série sont alimentés par une dérivation prise entre les fils extrêmes alors que leurs induits groupés en tension correspondent chacun à un pont. Si les quatre circuits sont également chargés, le même courant (figuré par des flèches) traverse tous ces bobinages du point a au point e et les dynamos tournent avec la même vitesse en absorbant peu d'énergie à la canalisation. Si au contraire, une des sections vient à être déchargée, soit BC par exemple, l'induit bc absorbe l'intensité abandonnée par les récepteurs de BC; il accélère donc son allure et entraîne ainsi les trois autres induits. Dans cd par exemple cette augmentation de vitesse crée un courant (qui s'oppose à la continuation du mouvement et qui est donc figuré par la flèche f). Ce courant s'ajoute à celui du réseau sur le pont CD et il en est de même sur les deux autres AB et DE. Les régulatrices transfèrent donc l'énergie d'un pont dans les autres.

On s'arrange d'ailleurs, ici comme dans le système à trois fils, de manière à répartir aussi uniformément que possible les récepteurs sur les quatre ponts. On peut, en supposant sur chacun d'eux une différence de potentiel de 110 volts, fournir suivant la nature des récepteurs, des tensions de :

110, 220, 330 ou 440 volts.

Distribution indirecte. — Elle s'applique surtout quand elle doit se faire sur une zone très étendue. En effet soit $E \times I$ la puissance à transmettre; la section des conducteurs dépend de cette intensité I et nous pouvons, au lieu d'effectuer le transport sous cette tension E, adopter un voltage nE avec une intensité $\frac{I}{n}$; les conducteurs

exigent ainsi une moindre section et la transmission est plus économique. Seulement cette force électromotrice élevée nE peut être dangereuse et, de plus, ne pas convenir aux récepteurs, d'où résulte la nécessité, au lieu d'arrivée, d'abaisser le voltage par une *transformation* du courant. C'est là une distribution *indirecte* de l'énergie électrique. Pour bien faire comprendre l'avantage que cette disposition peut présenter, prenons un exemple numérique :

Soit une puissance disponible de 100 kilowatts ; on veut la transmettre à 1000 mètres en admettant une perte dans la ligne égale à 10 % soit à 10 kilowatts.

1° Prenons un courant de 1.000 ampères sous 100 volts ; la perte $RI^2 = 10.000$ conduit à une résistance

$$R = \frac{10.000}{1000^2} = 0{,}01 \text{ ohm}$$

Or on a (voir page 72)

$$R = \frac{l \times 0{,}0159}{s}$$

$R = 0{,}01$
$l = 2.000$ mètres (aller et retour)
d'où

$$s = \frac{2.000 \times 0{,}0159}{0{,}01} = 3.180 \text{ mm}^2$$

Le poids et le prix de ce câble sont faciles à établir.

2° Au lieu de ce premier courant, admettons :

$$E' = 1.000 \text{ volts}$$
$$I' = 100 \text{ ampères}$$

Nous en tirons

$$R' = \frac{10.000}{100^2} = 1 \text{ ohm}$$

La nouvelle section s' devient donc

$$s' = 2.000 \times 0{,}0159 = 31^{\text{mm}^2}{,}80$$

Ainsi si nous ne faisons pas intervenir d'autre considération, nous pouvons réduire la section à la centième partie de sa valeur primitive sans modifier la perte d'énergie dans la ligne.

Généralement la distribution indirecte du courant continu se fait à *potentiel constant*. Il y a deux manières d'opérer : au moyen des *transformateurs rotatifs* ou par les *accumulateurs*.



Transformateurs rotatifs. — Ils consistent en des *dynamos doubles* ou en deux dynamos accouplées : le courant de la ligne appelé *primaire* et à haute tension

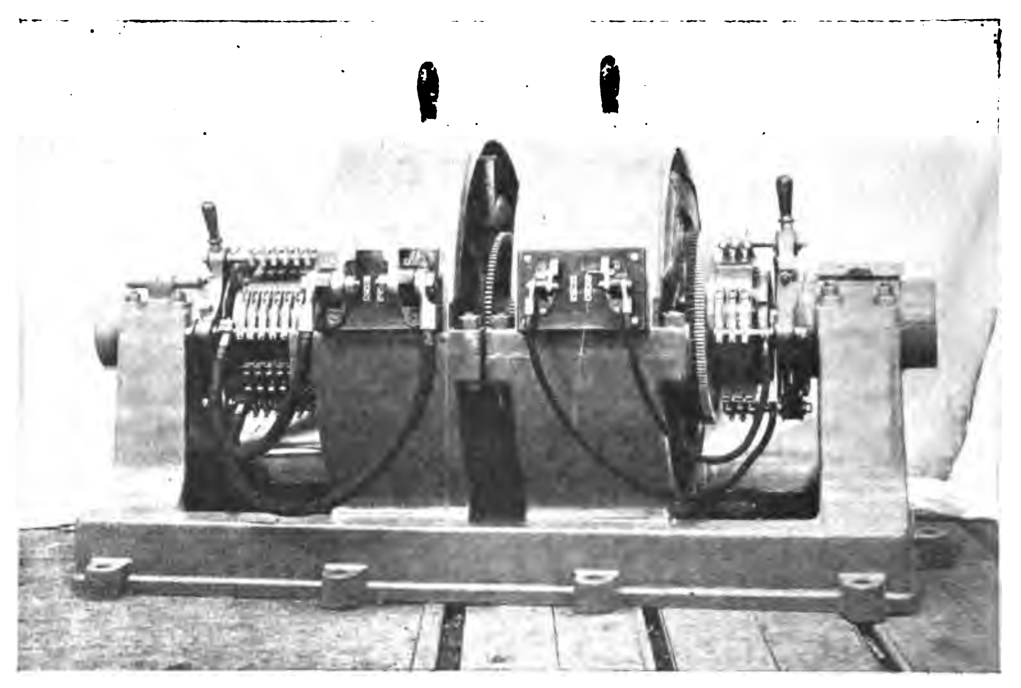


Fig. 537.

est reçu dans la première machine ; cette machine tournant comme moteur entraîne la seconde, laquelle engendre un courant *secondaire* de basse tension et de grande intensité.

Pour simplifier le dispositif, on peut :

1° Monter sur un même arbre les deux dynamos et en faire ainsi un groupe unique. La figure 537 montre une machine de la *Société Alsacienne* dans laquelle les deux socles sont fixés sur un même bâti.

2° Adopter un inducteur commun comme le montre la figure 538, qui se rapporte à un transformateur rotatif *Helmer* ; les deux induits munis chacun d'un collecteur tournent solidairement entre les pièces polaires de l'inducteur alimenté par le courant primaire. Ce courant arrive d'ailleurs en outre dans l'induit à fil long et fin et on recueille entre les bornes du second induit, à gros fil, le secondaire à basse tension.

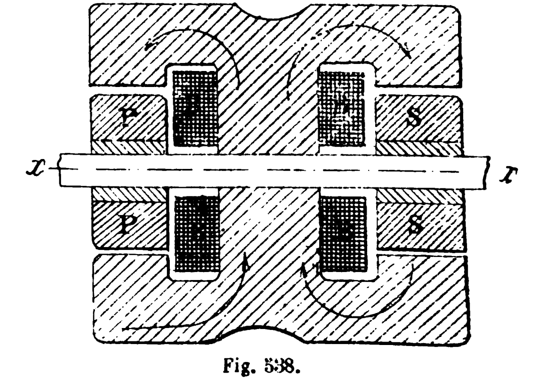


Fig. 538.

3° Souvent il n'y a qu'une armature d'induit et sur ce noyau sont montées les deux sortes de spires. On doit alors adopter bien

entendu deux collecteurs séparés et veiller d'une manière toute particulière au bon isolement des conducteurs car deux fils voisins peuvent présenter une grande différence de potentiel.

Au même groupe d'instruments se rattachent les *survolteurs* dont nous avons déjà parlé page 512. Ils sont formés ordinairement d'une dynamo-série accouplée à un moteur en dérivation dont la vitesse est constante. L'excitation de la dynamo-série augmente avec le débit d'où la production d'une f. é. m. proportionnelle à ce débit, et capable de compenser les pertes de tension dans la ligne.

Les stations centrales qui adoptent ce moyen disposent leurs transformateurs rotatifs dans des sous-stations chargées de distribuer aux récepteurs du voisinage le courant de basse tension. Les sous-stations de la *Société pour l'éclairage et la force par l'électricité*, de Saint-Ouen, reçoivent 2.400 volts et distribuent 110 volts dans leur voisinage.

Emploi des accumulateurs. — Les accumulateurs constituent des *transformateurs différés* de courant continu par rapport aux transformateurs rotatifs qui sont dits *immédiats*. On peut les employer de diverses manières :

1° Pour *constituer une réserve d'électricité*. Soit en effet une station centrale ; son débit est très variable avec l'heure de la journée et avec la saison. Or, elle doit être en mesure de satisfaire les demandes aux heures les plus chargées. Aux autres moments toutes les unités ne sont pas en service et celles qui fonctionnent travaillent souvent avec un mauvais rendement.

On y remédie en adjoignant aux machines des batteries d'accumulateurs. Alors les unités peuvent être moins nombreuses ou moins puissantes et elles fonctionnent toujours à pleine charge :

1° Aux heures de faible demande, elles chargent les accumulateurs, en même temps qu'elles desservent la distribution ;

2° Quand le débit exigé par les abonnés correspond au maximum des machines, on arrête la charge ;

3° Si la demande augmente encore, on utilise la décharge des couples secondaires en même temps que les machines ;

4° Lorsqu'une faible intensité est nécessaire, on arrête les machines et la batterie seule assure le service.

Supposons le cas particulier d'une petite station ayant à fournir au maximum 500 ampères sous 110 volts avec un débit moyen inférieur à la moitié de cette intensité. Au lieu d'une machine de 500 ampères, nous prendrons un groupe de 250 ampères et nous lui adjoindrons une batterie capable de donner les 250 ampères restants. Or, dans un premier projet, nous pouvons compter sur 1,5 ampère par kilogramme d'électrodes, cela nous conduit donc à des éléments secondaires de

$$\frac{250}{1,5} = 166 \text{ kilos environ}$$

Pour le nombre d'éléments, comptons sur $1^{v},85$ à la fin de la décharge et nous obtenons le chiffre :

$$\frac{110}{1,85} = 60 \text{ éléments}$$

2° Les accumulateurs peuvent être mis en tampon comme on l'a déjà expliqué (page 141). La figure 539 indique cette disposition.

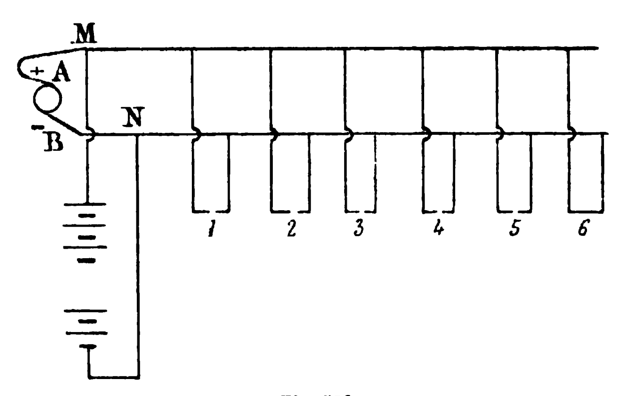


Fig. 539.

Par ce moyen, les irrégularités des moteurs se trouvent complètement masquées et un moteur à gaz ou à pétrole peut servir à l'alimentation de lampes à incandescence, très sensibles aux variations de voltage. Les couples d'ailleurs, dans ce cas, ne sont pas de grande capacité puisque la batterie n'est destinée à recevoir et à fournir que de petites quantités d'électricité.

Si on maintient ces éléments à pleine charge, on peut compter sur une f. é. m. individuelle de 2,5 volts, chiffre qui nous permet de fixer le nombre des couples secondaires. Quelquefois on augmente ce chiffre de deux unités; la série complète est mise en charge et on prend les extrémités du circuit de distribution en laissant en dehors le premier et le dernier éléments.

Quand il s'agit d'un réseau de tramways électriques, la régulation n'est pas aussi parfaite et on constate des écarts de voltage quelquefois considérables sur la ligne. On peut alors adjoindre à la batterie un transformateur rotatif servant de *survolteur-dévolteur* c'est-à-dire capable de *régler la charge ou la décharge* des accumulateurs suivant le débit.

La figure 537 représente un modèle de la *Société Alsacienne* de Belfort qui est applicable dans ce cas. Le *moteur* est alimenté par le réseau, ordinairement à 550 volts. Quant à la *génératrice*, elle est capable de survolter le courant de 150 volts environ. Les bobines inductrices de cette dynamo sont à deux enroulements, mais ces enroulements sont *inverses* l'un de l'autre : la portion *dérivation* est alimentée par la batterie et capable de porter à 700 volts le courant créé. La bobine *série* est traversée

par le courant de la ligne ; son effet *inverse* est donc d'autant plus considérable que le débit est plus intense : si ce débit est nul, le survolteur, excité seulement par le courant dérivé, produit 700 volts et met la batterie *en charge*. Cet effet continue si le courant demandé augmente, mais alors l'excitation série inverse augmentant, la charge devient moins importante pour s'annuler complètement quand le débit atteint une valeur donnée : alors le voltage de la dynamo survoltrice est réduit à 550 et la batterie est mise en parallèle avec les machines génératrices de l'Usine. Si le courant demandé croît encore, la batterie se *décharge* dans la ligne.

Grâce à ce système, les variations de marche des génératrices sont à peu près supprimées.

3° On peut encore disposer sur un circuit à haut voltage un certain nombre de batteries 1, 2, 3... dans des sous-stations (fig. 540). Des fils de distribution partent des

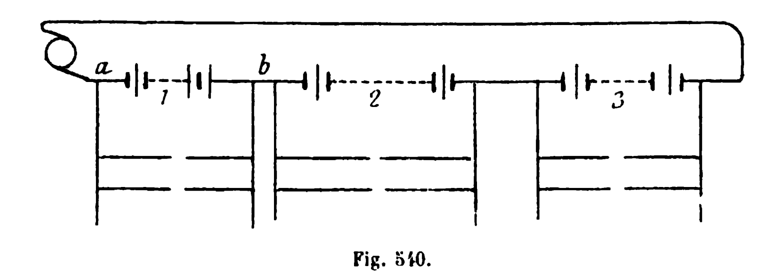


Fig. 540.

extrémités de chaque série et constituent autant de circuits distincts qu'il y a de batteries.

Ce même système sert encore à régler la tension sur les deux ou quatre ponts d'une distribution à fils multiples : il suffit de partager la batterie totale, en charge sur les fils extrêmes, en un nombre voulu de sections égales et de prendre ces points de division pour origines des fils intermédiaires.

Au lieu de charger ainsi les batteries en tension les unes sur les autres, on peut, à chaque sous-station, recevoir le courant de haut voltage et effectuer la charge par transformateur rotatif.

Enfin quelquefois chaque centre possède deux batteries, dont l'une est en charge pendant que l'autre alimente le circuit de distribution.

CHAPITRE IV

DISTRIBUTION PAR COURANTS MONOPHASÉS-TRANSFORMATEURS

On distribue assez rarement d'une façon directe l'énergie électrique sous la forme de courants alternatifs simples. En effet, l'avantage de ces courants réside surtout dans la facilité de leur *transformation*; la distribution est donc toujours *indirecte*. Cela nous amène à parler d'abord des *transformateurs*.

Principe des transformateurs. — Il nous est connu, car il ne diffère pas de celui de la bobine de Ruhmkorff: deux enroulements distincts entourent un même circuit magnétique; dans l'un passe le courant que l'on veut transformer et dans l'autre on recueille le courant modifié.

Seulement, ici, les conditions sont ordinairement opposées de celles de la bobine de Ruhmkorff; en effet, nous voulons maintenant, au moyen du courant de *haute tension* envoyé dans une ligne, obtenir un *débit considérable* sous un *voltage modéré*. Le premier circuit, celui qui communique avec la ligne, s'appelle *primaire*, l'autre est le *secondaire*. Nous pouvons dès maintenant en conclure que le primaire doit être à fil long et fin tandis que le secondaire est constitué par un fil gros et court.

Ces transformateurs, par opposition à ceux que nous avons indiqués dans le cas des courants continus et à ceux que nous étudierons plus loin sous le nom de machines *commutatrices*, portent souvent le nom de *transformateurs statiques*.

La théorie des transformateurs est trop complexe pour que nous puissions la traiter; nous nous contenterons d'indiquer quelques points particuliers.

Supposons qu'entre les bornes du primaire, nous établissions une différence de potentiel alternative e_1. Si r_1 et i_1 sont respectivement la résistance ohmique et l'intensité du courant dans le circuit; si d'autre part n_1 représente le nombre des spires et $\mathfrak{N}$ le flux obtenu, nous pouvons écrire

$$e_1 = r_1 i_1 + n_1 \frac{d\mathfrak{N}}{dt}$$

Or le calcul montre que le terme $r_1 i_1$, c'est-à-dire la chute ohmique de tension est négligeable à côté du second terme. On a donc approximativement

$$(1) \qquad e_1 = n_1 \frac{d\mathfrak{N}}{dt}$$

On en conclut aisément, par intégration, que si la f. é. m. est sinusoïdale, le *flux* engendré est de même forme.

Admettons encore que le circuit secondaire soit *non inductif* (tel est le cas d'une distribution à des lampes à incandescence). Alors si r_2 et i_2 sont la résistance et l'intensité dans le fil secondaire et si n_2 est le nombre des spires, nous pouvons écrire

$$(2) \qquad r_2 i_2 + n_2 \frac{d\mathfrak{N}}{dt} = 0$$

car il n'y a pas de source de f. é. m. dans cette partie de la distribution.

En combinant (1) et (2) nous obtenons

$$n_2 e_1 + n_1 r_2 i_2 = 0$$

d'où nous tirons

$$i_2 = -\frac{n_2}{n_1 r_2} \times e_1$$

L'*intensité* dans le réseau *secondaire* est donc, à chaque instant, proportionnelle à la *f. é. m.* du *primaire* et si cette dernière est sinusoïdale, le *courant* secondaire est de même forme. Dans notre hypothèse d'une distribution non inductive, nous pouvons écrire

$$e_2 = i_2 r_2$$

d'où

$$(3) \qquad e_2 = -\frac{n_2}{n_1} \times e_1$$

La f. é. m. secondaire est donc alors proportionnelle à chaque instant à la f. é. m. du primaire. Le quotient

$$\frac{n_2}{n_1}$$

qui intervient dans cette relation, s'appelle *rapport de transformation*; c'est celui du nombre de spires des deux enroulements. On peut donc poser

Tension secondaire = Tension primaire × Rapport de transformation.

On peut, de cette relation, tirer une conséquence très importante : *Si nous établissons entre les bornes du primaire une tension alternative dont le maximum est*

constant, nous recueillons une tension secondaire de maximum également invariable.

Remarquons d'ailleurs que cette proposition n'est qu'approximative. En réalité si le débit croît, on observe une diminution de voltage pour les raisons suivantes :

1° Chute de potentiel ohmique dans le primaire;

2° Fuites de lignes de force d'autant plus importantes que le débit est plus considérable car la perméabilité du fer va en décroissant comme on l'a vu;

3° Chute de potentiel ohmique dans le secondaire.

Rendement d'un transformateur. — Soient :

P_1 la puissance fournie à l'appareil par la ligne;

P_2 celle que l'on recueille entre les bornes du secondaire (puissance utile).

On appelle rendement le rapport

$$R = \frac{P_2}{P_1}$$

La puissance P_1 s'évalue au moyen d'un wattmètre. Quant à la valeur de P_2, on peut la déterminer aisément, si le secondaire ne présente pas de self, en mesurant e_2 et i_2.

On trouve ainsi un rapport qui s'élève jusqu'à 98 %.

Les pertes d'énergie sont dues :

1° A l'effet Joule dans les deux enroulements. On sait que cet effet est sensiblement proportionnel au carré de i c'est-à-dire au carré de la charge, quand e est constant;

2° A l'hystérésis dans le fer;

3° Aux courants de Foucault dans le même métal.

Ces deux causes de perte sont d'ailleurs indépendantes sensiblement de la charge du transformateur; appelons p leur valeur et désignons par p' celles des pertes calorifiques; nous avons

Puissance utile : P_2.

Puissance dépensée : $P_2 + p + p'$.

Rendement $R = \dfrac{P_2}{P_2 + p + p'}$.

La discussion de cette formule montre que le rendement est faible pour de faibles charges; il augmente avec la charge et passe par un maximum de valeur pour une charge donnée. Une surcharge diminuerait la valeur de ce rendement.

Voici les diverses valeurs de ce rendement déterminées sur un transformateur donné :

Au dixième de charge.	86 %
Au quart —	93 —
A demi-charge	96 —
A pleine charge.	97 —



Quant à la répartition des pertes entre le métal magnétique et le cuivre, on trouve que cette première portion ne doit jamais dépasser la perte dans le cuivre et on s'arrange ordinairement de manière que les deux parties soient égales au moment où le transformateur est à son régime ordinaire. Ainsi par exemple soit un appareil devant toujours fonctionner à pleine charge (transformateur de sous-station); la perte dans le cuivre égalera alors celle dans le fer et si par hasard l'appareil fonctionnait sous une charge réduite, la consommation d'énergie dans le fer dépasserait celle qui a pour siège les conducteurs électriques.

Au contraire un transformateur soumis à un régime variable et ordinairement inférieur à sa charge maxima provoquera, à *son débit moyen*, une perte égale dans le cuivre et dans le fer. De cette manière son rendement sera alors maximum; c'est le cas d'un transformateur d'abonné à une distribution. Si cet appareil marche à pleine charge, le cuivre absorbe plus d'énergie que le fer et le rendement décroît.

Cette perte dans le cuivre se partage d'ailleurs encore en parties à peu près égales entre les deux enroulements primaire et secondaire.

Il est possible d'évaluer expérimentalement la quantité d'énergie perdue dans un transformateur : on se base, pour l'*hystérésis* et les *courants de Foucault* réunis, sur ce fait que les pertes magnétiques sont sensiblement indépendantes de la charge; on alimente donc le primaire à sa tension normale en laissant *ouvert* le *circuit secondaire*. De cette façon, la puissance consommée, et mesurable P, exprime l'ensemble des pertes p dans le fer et π dans le cuivre du primaire. Or ce dernier terme π, à vide, est très faible; nous pouvons donc écrire $p = P$. Remarquons que nous aurions pu effectuer cet essai différemment : établir entre les bornes du secondaire une tension alternative égale à celle de ce circuit, en temps normal, et laisser le primaire à circuit ouvert; cette méthode est importante dans le cas où l'on ne dispose pas d'une tension d'essai considérable.

Pour mesurer les pertes dues au cuivre à pleine charge, on ferme le secondaire en court-circuit sur un ampèremètre et on modifie la tension primaire jusqu'à lire, sur l'appareil de mesure, une intensité égale au débit normal du réseau. A cet instant, si on évalue, au moyen d'un wattmètre, la puissance consommée, on connaît approximativement l'effet Joule, étant donné que le fer s'aimante faiblement dans cette expérience.

Classification des transformateurs. — Nous pouvons *a priori* en distinguer deux classes :

1° Appareils à circuit magnétique ouvert,

2° — — fermé.

Les transformateurs à circuit magnétique ouvert rappellent la bobine de Ruhmkorff; ils présentent cet inconvénient d'une réluctance considérable et de fuites magnétiques importantes.

La première forme de transformateur industriel a été réalisée par MM. Gaulard et

Gibbs en 1883; leur appareil, à circuit ouvert, était muni de deux enroulements constitués par des rondelles de cuivre réunies les unes aux autres de façon à former deux bobines distinctes mais enchevêtrées l'une dans l'autre sur un noyau rectiligne commun.

Actuellement cette disposition est abandonnée. Cependant M. Swinburne, dans le but de diminuer la perte moyenne dans les transformateurs travaillant le plus souvent sous une charge réduite, est revenu au circuit ouvert et a constitué le *transformateur hérisson* : un paquet de longs fils de fer isolés constitue le noyau. Sur ce noyau est enroulé d'abord le fil secondaire, puis vient l'enroulement à fil fin partagé en plusieurs bobines. Les fils de fer qui dépassent les enroulements sont ensuite séparés les uns des autres d'où le nom donné à ce transformateur. On comprend que le rôle de ces fils divergents est de guider les lignes de force. Le rendement de cet appareil atteint celui des autres.

Le plus ordinairement le circuit magnétique est *fermé*, et, dans cette classe de transformateurs, on distingue deux dispositions différentes :

a) Le circuit magnétique fermé est simple;
b) — — — est double;

Occupons-nous d'abord du premier mode.

Transformateurs à circuit magnétique simple. — La carcasse (fig. 541) est ordinairement constituée par des tôles de 0,3 à 0,5 millimètre d'épaisseur, isolées de façons diverses, soit au papier, soit au vernis, soit encore par une couche d'oxyde.

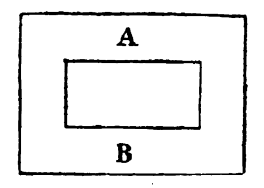


Fig. 541.

D'une manière générale, il y a trois manières de disposer les circuits électriques sur ce noyau :

a) Les enroulements peuvent, comme dans les bobines de Ruhmkorff, se superposer. Ce système évite, comme on le voit les pertes de flux. D'un autre côté la construction est difficile et le bon isolement demande des soins tout spéciaux. On peut, par exemple, partager les deux circuits en deux portions mises sur les côtés A et B de la carcasse.

b) Dans le but de permettre l'enroulement préalable et au moyen d'un tour, on sépare quelquefois complètement les deux circuits: l'un est passé sur le noyau A, l'autre sur B, mais le moyen expose à des fuites magnétiques : le flux qui traverse A n'est pas forcément celui qui passe à la partie B. Cet effet réduit la tension aux bornes du secondaire.

c) On trouve enfin des transformateurs dont le circuit magnétique unique est entouré de bobines primaires et secondaires alternées ; tel est le cas d'un modèle *Ganz et Cie* très répandu : la carcasse est un anneau de tôle, ressemblant à l'anneau Gramme, sur lequel s'enroulent les deux circuits.

Transformateurs à circuit magnétique double. — Nous pouvons encore

rencontrer dans cette classe deux types différant entre eux par la situation respective des enroulements.

a) Les deux 1 et 2 sont *accolés* (fig. 542) sur un noyau commun AB; quant aux lignes de force, elles se bifurquent en B pour rejoindre l'extrémité A par des chemins différents. On a ainsi une forme dite *cuirassée* qui présente des avantages surtout au point de vue des pertes dans le cuivre et en effet, la réluctance étant diminuée par la disposition même du circuit magnétique, les ampères-tours peuvent être réduits. Par contre le volume du fer augmente, d'où un accroissement possible des pertes magnétiques. D'un autre côté, le refroidissement de l'appareil est moindre que dans les modèles précédents.

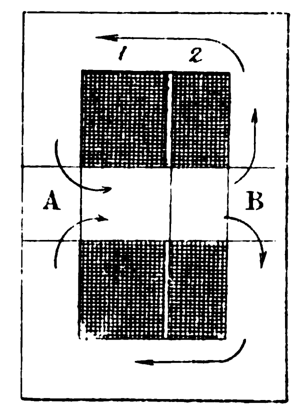


Fig. 542.

Les transformateurs *Westinghouse* réprésentés par les figures schématiques 543 et 544 répondent encore à ce même type: les tôles, découpées à l'avance suivant le modèle de la

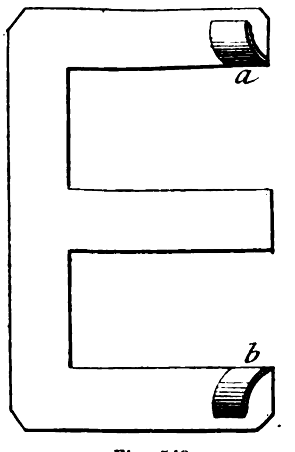


Fig. 543.

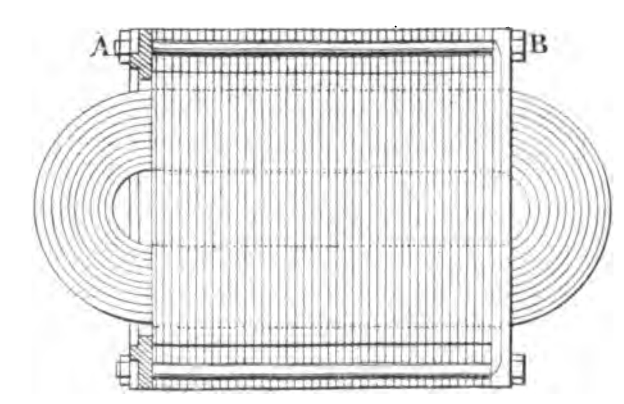
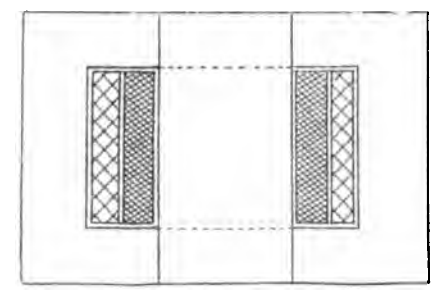
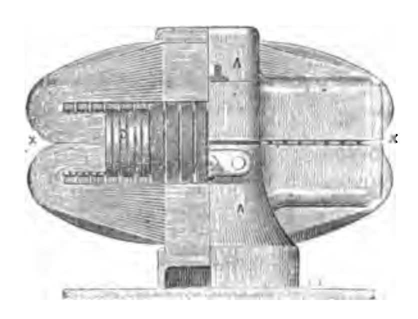


Fig. 544.

première sont passées une par une à travers les bobines enroulées au préalable. Cette introduction demande bien entendu que l'on relève les lames *a* et *b*. Dès qu'une tôle est passée, on rabat les deux ailes et on procède à la mise en place de la suivante en opérant de gauche à droite si la précédente a été passée de droite à gauche. De cette manière tous les joints se trouvent alternés. Quatre tiges métalliques, telles que AB, isolées de la masse, permettent d'effectuer le serrage des tôles entre deux plaques de fonte.

b) Les deux circuits peuvent encore ici être superposés comme le montre la figure 545, dans le but de réduire les pertes de flux magnétique.


Fig. 545.


Fig. 546.

Cette disposition est adoptée dans un certain nombre de transformateurs : citons en particulier le modèle *Ferranti* (fig. 546) ; le noyau est en tôles primitivement planes et de grande longueur. Ces lames, après la mise en place des bobinages, sont repliées les unes au-dessus des enroulements, les autres au-dessous. On forme ainsi un circuit magnétique bifurqué et l'ensemble est serré entre deux pièces de fonte qui constituent la carcasse et le socle de l'instrument.

Emploi des transformateurs dans les distributions à courants monophasés. — Les transformateurs statiques permettent d'envoyer dans une ligne des courants de haute tension tout en *distribuant* l'électricité sous un *voltage modéré* Il en résulte :

1° Un *double* avantage au point de vue *économique* :

a) Dans les frais de premier établissement;

b) Dans la consommation moindre d'énergie.

2° Cette autre propriété qu'une mise à la terre accidentelle chez un abonné n'intéresse que les récepteurs ou les groupes de récepteurs branchés sur le circuit secondaire défectueux. Le primaire, c'est-à-dire le courant principal n'est pas atteint comme il le serait dans une distribution directe.

Le plus ordinairement la ligne reçoit immédiatement le courant à haute tension des alternateurs; mais dans certains cas ce courant est lui-même transformé par un premier appareil qui élève son voltage à la valeur voulue; cette combinaison permet de faire usage de machines à tension moyenne.

On peut distinguer deux manières principales de grouper les transformateurs sur le circuit primaire, en *série* ou *en dérivation*.

Transformateurs en série. — Tous les *primaires* sont alors disposés en tension sur la ligne (fig. 547). La théorie des transformateurs nous indique que, si on maintient une *intensité constante* dans un circuit, chaque secondaire est lui-même

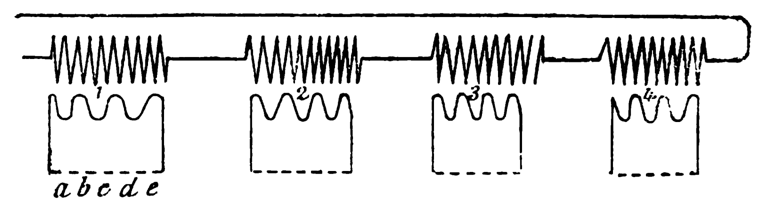


Fig. 547.

traversé par un *courant constant*; il faut donc placer tous les appareils d'utilisation

tels que a, b, c, d et e en série les uns par rapport aux autres. Ce système présente les avantages et les inconvénients des modes de distribution à intensité constante, soit :

1° *Avantage* : réduction de la section des distributions secondaires.

2° *Inconvénients* : a) Solidarité de tous les récepteurs d'un même circuit et obligation de les munir d'un système automatique de mise en court-circuit.

b) Rendement défectueux aux heures de faible demande. En raison de ces inconvénients la distribution par transformateurs en série est à peu près limitée à l'éclairage des villes par arcs voltaïques car, dans ce cas, toutes les lampes sont allumées et éteintes au même instant.

Transformateurs en dérivation. — C'est le moyen le plus couramment employé : tous les transformateurs sont montés, par leurs primaires, en dérivation sur les deux fils de la ligne (fig. 548). Si, entre ces deux conducteurs, on maintient une différence de potentiel efficace constante, on recueille une tension également invariable entre les bornes de tous les secondaires ; il faut alors établir tous les appareils d'utilisation a, b, c, d en dérivation eux-mêmes sur chacun des circuits, comme la figure le montre pour le transformateur 1.

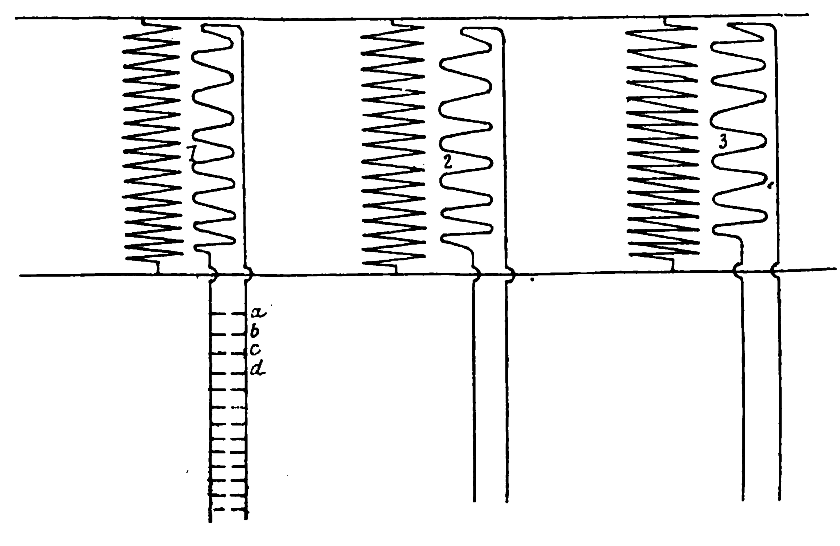


Fig. 548.

On peut d'ailleurs, ici comme dans le cas des courants continus, faire usage de *feeders*, maintenir la tension constante dans le *réseau primaire* au moyen d'un nombre convenable de conducteurs, ce qui permet d'étendre encore la zone desservie,

Dans tous les cas, il s'agit de régler les alternateurs de la station centrale. Ce réglage s'effectue au moyen des excitatrices, généralement par un rhéostat placé soit sur le courant d'excitation lui-même, soit sur les inducteurs de l'excitatrice. Les modifications à apporter dans cette manœuvre sont d'ailleurs indiquées par la *tension secondaire*, c'est-à-dire celle qui est *utilisée*. Mais on ne fait pas usage de fils pilotes,

on a un instrument appelé *égalisateur de tension* qui donne, à chaque instant, la tension chez l'abonné. La disposition de l'égalisateur est variable; l'une des plus simples consiste en un transformateur double dont les deux primaires sont alimentés:

1° L'un A par une dérivation prise sur la ligne;

2° L'autre B par le courant principal.

Le premier transformateur peut donc être ajusté de telle manière que la tension aux bornes secondaires égale celle qu'on aurait chez l'abonné s'il n'y avait pas de chute de tension dans la ligne; aux bornes du deuxième secondaire nous avons une différence de potentiel (*proportionnelle au débit*) qui peut être rendue égale à la perte dans les conducteurs. La différence des deux voltages secondaires égale alors la tension utilisée par les appareils récepteurs et il suffit pour en connaître la valeur de placer un voltmètre sur le circuit des deux secondaires *mis en opposition* (fig. 549).

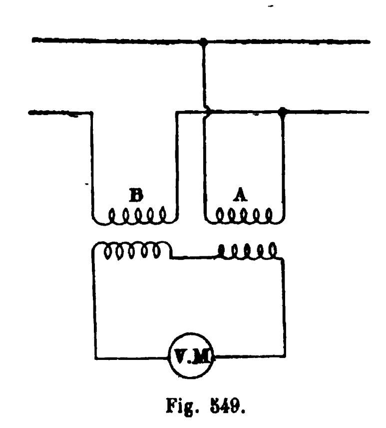


Fig. 549.

Il y a d'ailleurs deux façons d'employer ces transformateurs; on peut faire usage de transformateurs *isolés* ou d'appareils *groupés en sous-stations.*

Transformateurs isolés. — Chaque abonné a, dans ce cas, son appareil de transformation distinct. Cet instrument est placé de préférence de manière à être inaccessible: soit sur une console extérieure, soit sur le poteau (si la canalisation est aérienne) soit dans la cave ou dans une excavation spéciale (si les fils sont souterrains). Ce système d'un transformateur par abonné présente cet inconvénient qu'à toute heure de la journée, même quand l'abonné ne consomme pas, le courant principal traverse le primaire. Pendant tout ce temps, les pertes magnétiques restent entières ce qui diminue le rendement moyen des appareils. C'est justement cela qui a conduit M. Swinburne à revenir aux transformateurs à circuit magnétique ouvert.

Transformateurs groupés en sous-stations. — Ces sous-stations peuvent être établies dans des kiosques ou dans des excavations disséminées en divers points de la zone à desservir. Chaque groupe de transformateurs alimente alors un nombre plus ou moins grand d'abonnés du voisinage. Chacun des transformateurs est toujours maintenu à pleine charge ou à peu près car on peut, ordinairement d'une façon automatique, retirer du circuit ou remettre en service un ou plusieurs transformateurs suivant la consommation d'énergie.

Cette disposition en *sous-stations* permet d'ailleurs l'emploi d'un fil intermédiaire dans le réseau secondaire et par suite procure les avantages de la distribution à trois conducteurs.

CHAPITRE V

DISTRIBUTION PAR COURANTS POLYPHASÉS

En général cette distribution se fait avec l'aide de transformateurs et on réalise, de cette manière, une économie notable sur les conducteurs et sur la perte d'énergie.

Transformateurs polyphasés. — Ils ne diffèrent des transformateurs monophasés que par la disposition d'un nombre de bobines égal au nombre des phases. Les noyaux magnétiques sont d'ailleurs réunis par des culasses communes. Ainsi pour *courants diphasés*, on a deux noyaux entourés chacun de deux enroulements distincts. Chaque primaire reçoit l'une des phases du courant à transformer et l'on recueille entre les quatre bornes secondaires, deux courants séparés conservant l'un par rapport à l'autre la même différence de phase qu'entre les circuits principaux. Ces transformateurs sont d'ailleurs rarement employés car on préfère ordinairement faire usage de deux transformateurs monophasés séparés que l'on place sur chaque phase. Les courants triphasés se transforment au moyen de trois doubles bobines; ces transformateurs portent trois bornes primaires et trois secondaires et le montage s'effectue, comme pour tous les appareils triphasés, soit en *triangle*, soit en *étoile*. La fig. 550 représente un tel transformateur; on voit que les bobines sont maintenues par les culasses servant en même temps de socle et de couvercle à l'instrument.

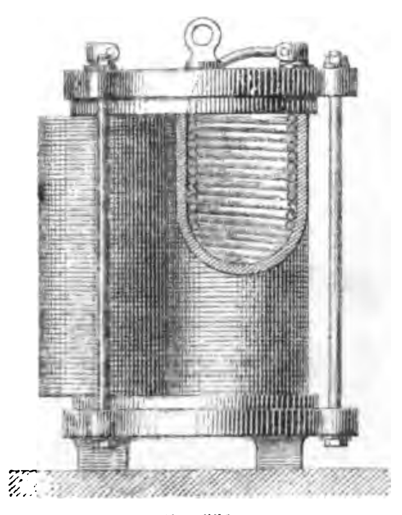


Fig. 550.

On a reproduit (fig. 551 et 552) l'ensemble avec coupes partielles d'un transforma-

teur triphasé *Ganz et Cie* de 300 kva ; il est formé de trois noyaux verticaux et lamellés, réunis entre eux par deux culasses horizontales également lamellées.

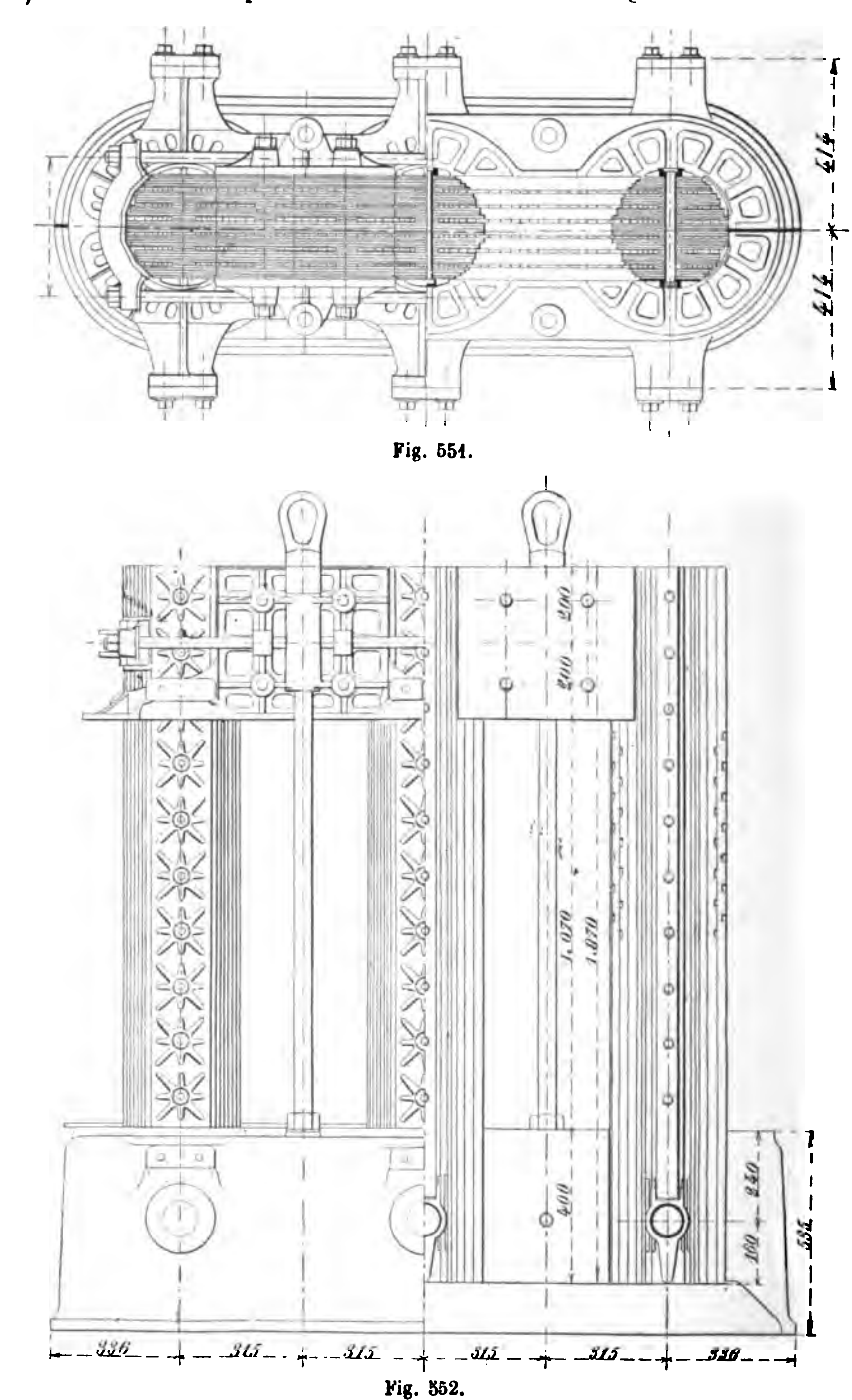


Fig. 551.

Fig. 552.

Les bobines sont placées directement sur les noyaux et les secondaires, en barres de

cuivre, sont extérieures. Le refroidissement est assuré par un vide ménagé entre les deux enroulements et par des espaces d'air dans les noyaux.

La première station importante de courants polyphasés a été celle de Lauffen-Francfort en 1891. Deux alternateurs à trois phases installés à Lauffen et accouplés à des turbines engendraient le courant sous 50 volts ; deux transformateurs bien isolés à l'huile et réunis en parallèle par leurs primaires élevaient la tension à 8.000 volts sur chaque phase. Les secondaires étant couplés en tension, on obtenait une f. é. m. de 15.000 volts environ et l'on faisait usage pour le transport, d'une ligne en conducteurs nus de 4 millimètres de diamètre soutenue par isolateurs à l'huile. Une transformation au point d'arrivée, distant de 175 kilomètres de la station génératrice, ramenait le voltage à 50 et l'on recueillait ainsi environ les 75 % de l'énergie mesurée sur l'arbre des turbines.

L'intérêt des courants polyphasés et surtout *triphasés* réside, comme nous le verrons plus tard, dans l'alimentation des moteurs électriques. Ces courants permettent d'ailleurs de réaliser une économie sensible de conducteur (à perte égale) sur les courants monophasés ; en effet si on prend pour unité le poids des conducteurs nécessaires, dans les conditions fixées, pour transporter les courants à une seule phase, il faut la même quantité pour les *diphasés* avec deux circuits distincts, mais 0,95 seulement si on prend un fil de retour commun pour les deux phases (trois conducteurs au lieu de quatre) et 0,75 environ pour les courants triphasés.

CHAPITRE VI

DISTRIBUTIONS POLYMORPHIQUES

On désigne ainsi celles qui peuvent fournir à volonté des courants sous plusieurs formes, c'est-à-dire soit du courant continu soit des courants alternatifs mono ou polyphasés. En raison de la simplicité des alternateurs et de la facilité des transformations, on emploie généralement comme primaires des courants alternatifs à une ou plusieurs phases et l'on effectue les diverses transformations suivant les nécessités. Nous allons donc avoir à examiner les appareils propres à opérer ces changements de forme des courants. D'une manière générale, les transformations que l'on peut se proposer d'effectuer sont nombreuses. Les plus importantes, au point de vue pratique, sont celles qui convertissent les courants polyphasés en continu. On y arrive par deux ordres de moyens :

1° *Indirectement*, par des récepteurs polyphasés actionnant des dynamos. Les ensembles portent alors le nom de *moteurs-générateurs*.

2° *Directement*, en se servant d'appareils tels que *commutatrices ou convertisseurs*, *transformateurs-redresseurs*, etc.

Nous joindrons à ces transformations celles qui ont pour but de modifier le nombre des phases des courants ce qui nous amènera à parler de transformateurs spéciaux tels que celui de *M. Scott* et de *combinaisons* telles que le *système monocyclique*.

Moteurs-générateurs. — Les deux parties sont absolument distinctes et reliées entre elles par un accouplement quelconque. Le moteur est ordinairement *asynchrone* (voir *Moteurs*).

La fig. 553 représente un modèle de la *Société alsacienne de Belfort* destiné à la station centrale des tramways de Lille ; il se compose d'un moteur triphasé pouvant développer 75 HP alimenté par du courant à 5.500 volts, 25 périodes ; ce moteur est muni d'un coupleur automatique qui lui permet de démarrer sans rhéostat avec un couple au plus égal aux trois quarts du couple normal ; il est accouplé par manchon

élastique avec une génératrice à courant continu débitant 450 ampères sous 110 volts. Vitesse du groupe 500 tours par minute.

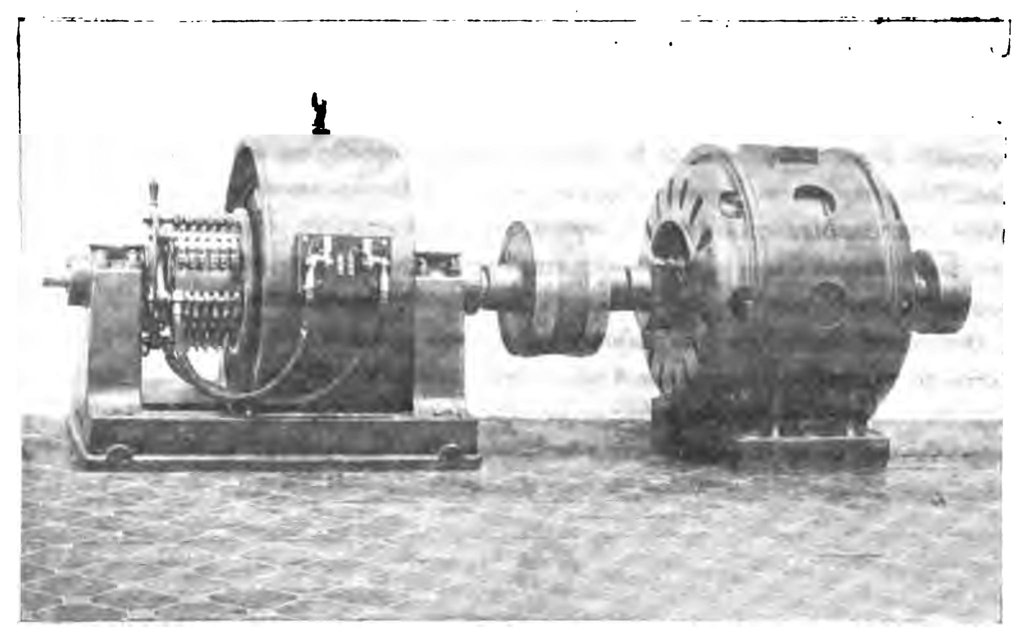


Fig. 553.

Ces appareils doubles présentent l'*avantage* de donner une grande liberté de réglage à cause de l'indépendance des deux machines et de plus un démarrage ordinairement plus facile. Mais ils ont par contre plusieurs *inconvénients* sur l'emploi d'un appareil unique (commutatrice) :

Prix plus élevé.

Encombrement supérieur.

Rendement moindre ordinairement.

Commutatrices ou convertisseurs. — Ces machines reposent sur ce fait fondamental qu'un anneau Gramme, tournant dans un champ magnétique, peut donner à volonté des courants de diverses formes :

1° Du *continu*, de tension e, si l'on fait usage du collecteur Gramme ;

2° Du *monophasé* au moyen de deux bagues reliées à deux points diamétralement opposés de l'anneau. La tension disponible alors vaut, toutes choses égales, $\frac{e}{\sqrt{2}} = 0,707\, e$;

3° *Des courants diphasés* de même tension quand on fait usage de quatre bagues reliées à des points distants de 90° ;

4° *Des triphasés* de f. é. m. $\frac{e}{2}\sqrt{\frac{3}{2}} = 0,612\, e$ par le moyen de trois prises à 120°.

Admettons que la machine reçoive du continu au moyen de son collecteur ; elle tourne comme moteur et atteint une vitesse de régime telle que sa force contre-électromotrice (voir plus loin *Moteurs à courant continu*) égale la tension fournie e. Alors notre machine est assimilable à une dynamo donnant un voltage e et si nous disposons des connexions et des bagues convenables, nous obtenons entre ces bagues les f. é. m. alternatives conformes au tableau ci-dessus. La fréquence des courants recueillis dépend d'ailleurs de la vitesse atteinte, laquelle est reliée à e et à l'excitation. Réciproquement si nous fournissons ces mêmes tensions alternatives à la machine *convenablement lancée*, nous obtenons du *continu* et c'est de cette manière que les commutatrices sont surtout employées. Quand le régime est bien établi, le courant nécessaire à l'excitation est pris sur le collecteur Gramme.

Ordinairement la ligne *polyphasée* est à haute tension ; on ramène, par un *transformateur statique*, le voltage à une valeur modérée (400 ou 500 volts sur chaque fil). On associe à la commutatrice un *groupe de démarrage* constitué par un moteur *asynchrone*, di ou triphasé comme la ligne, actionnant par un manchon d'accouplement une génératrice continue, le tout d'assez faible puissance.

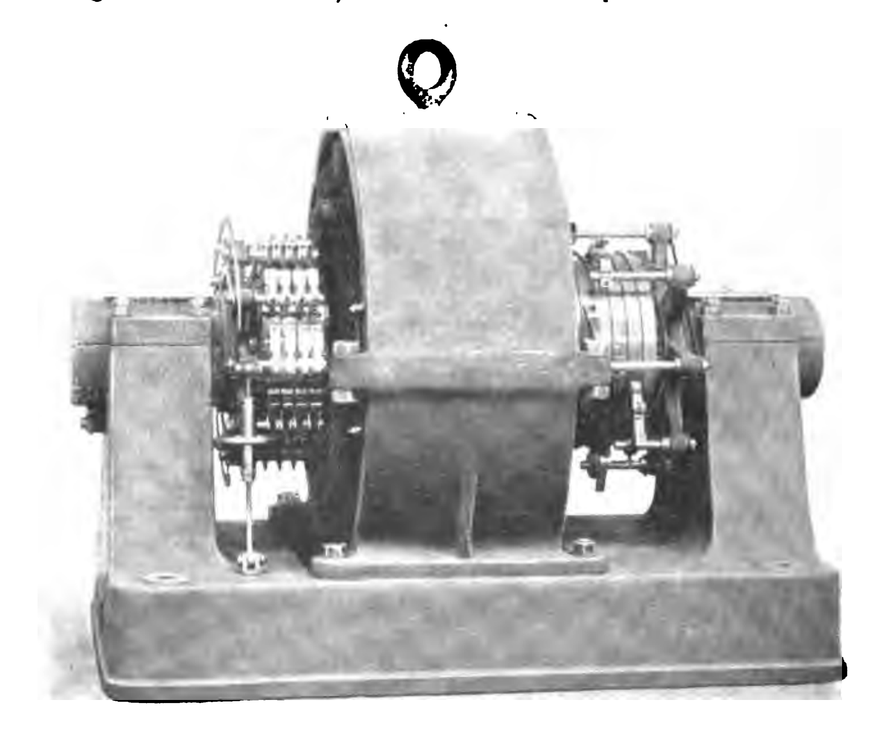


Fig. 554.

Les courants les plus employés, dans ce cas, sont les *triphasés* : la commutatrice présente donc au point de vue des inducteurs et de l'induit, la disposition d'une dynamo mais elle est munie d'un côté du collecteur Gramme, de l'autre de trois bagues et de trois balais recevant les courants primaires. Quelquefois un transforma-

teur particulier, branché sur les courants à trois phases, double ce nombre de phases et permet d'améliorer le fonctionnement de la commutatrice tout en augmentant sa puissance.

La figure 554 reproduit une commutatrice de la *Société alsacienne*.

On a figuré encore (fig. 555) une commutatrice des *Ateliers d'Œrlikon* destinée spécialement à la transformation des triphasés à haute tension en continus à 500 volts pour les services de tramways.

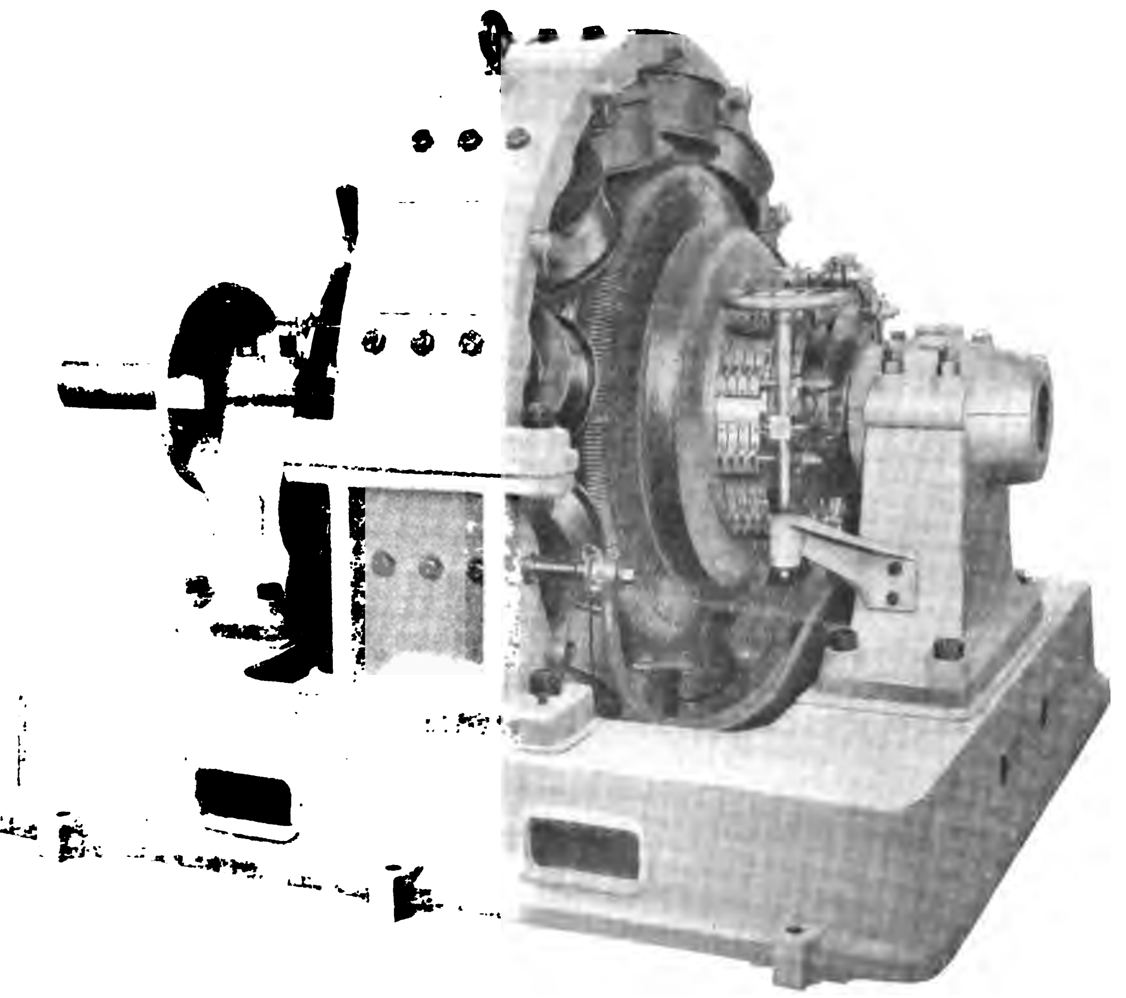


Fig. 555.

Pour maintenir constante la tension continue malgré les variations de charge, on peut faire usage de divers moyens parmi lesquels on signalera :

1° L'emploi de bobines de self dans les circuits d'alimentation, mais cette méthode introduit un décalage sur le circuit et le réglage ainsi obtenu devient de moins en moins actif à mesure que la charge diminue ;

2° Les *survolteurs*. Ceux de la *Société alsacienne* consistent en moteurs asyn-

chrones triphasés (voir plus loin l'étude de ces moteurs) à induit bobiné. Cet induit est maintenu fixe dans une position correspondant au réglage qu'on veut obtenir. Les bobines extérieures sont mises en série sur la ligne à trois phases ; l'enroulement intérieur est aussi branché sur le circuit et il induit dans les bobines extérieures des f. é. m. plus ou moins décalées, suivant la position donnée, lesquelles s'ajoutent aux courants de la ligne.

Transformateurs-redresseurs. — Ces appareils, dus à M. Leblanc, ont été désignés provisoirement sous le nom caractéristique de *panchahuteurs*. Supposons qu'il s'agisse, comme dans les cas précédents, de transformer les courants triphasés en continu ; on fait passer les courants de la ligne dans les trois primaires du *transformateur-redresseur*. Chacun des trois secondaires est constitué par n bobines formées de nombres appropriés de spires

p_1 p_2 p_3 . . . p_n pour le premier
p'_1 p'_2 p'_3 . . . p'_n pour le second
p''_1 p''_2 p''_3 . . . p''_n pour le troisième

Couplons en série les trois enroulements $p_1\ p_1'\ p_1''$, sièges de trois courants décalés les uns sur les autres d'un tiers de période ; nous obtenons un courant alternatif *résultant* dont la f. é. m. et le décalage sont faciles à déterminer par la méthode géométrique (indiquée page 420 pour le cas de deux f. é. m. seulement) applicable à un nombre quelconque de courants. Opérons de même pour $p_2\ p_2'\ p_2''$ etc. : nous formons n circuits dans lesquels il est possible, en disposant convenablement des nombres de spires des $3n$ bobines, d'obtenir l'égalité des tensions et l'échelonnement des décalages successifs. Ces n circuits sont donc dans les mêmes conditions que les n bobines consécutives qui constituent un anneau Gramme. Groupons-les en tension et rattachons leurs n entre-sections aux lames, en nombre égal, d'un collecteur Gramme : nous pouvons obtenir du courant continu et il suffit pour cela :

Ou bien de rendre mobile le collecteur par rapport à deux balais fixes ;

Ou bien de faire tourner le système des balais à la surface du collecteur immobile.

Dans l'un et dans l'autre cas, ce mouvement est commandé par un *moteur synchrone*, c'est-à-dire dont la vitesse est réglée sur la fréquence des courants alternatifs employés.

Transformateur de M. Scott. — Il a pour but de changer le nombre des phases du courant. Le cas qui peut se présenter le plus ordinairement consiste à changer les triphasés en diphasés (pour lumière par exemple). L'appareil employé alors consiste en un double transformateur dont les deux primaires AB et CD sont alimentés de courants triphasés par l'artifice suivant : les trois points A, B et D sont connectés aux fils de la ligne tandis que le conducteur restant C est réuni au milieu E de l'enroulement AB ; dans ces conditions les bobines secondaires sont les sièges de deux f. é. m. décalées l'une sur l'autre d'un quart de phase. Et en effet prenons pour

origine de phase celle de AB; celle de BD est en retard d'un tiers de période sur l'origine, donc si nous voulons trouver la phase de CD ou de ED, nous avons à composer deux f. é. m. :

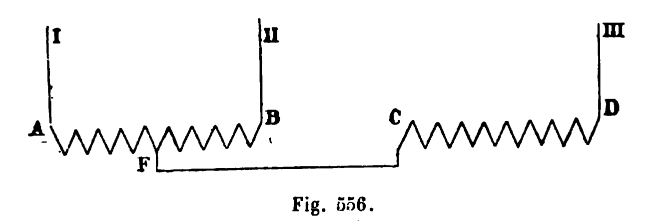


Fig. 556.

1° Celle de EB soit $\frac{E}{2}$ de phase origine si nous appelons E la f. é. m. de chaque pont des triphasés ;

2° Celle de BD c'est-à-dire E en retard d'un tiers de période sur la première.

La méthode géométrique nous montre (fig. 557) que la résultante de ces deux tensions maxima $Oa = \frac{E}{2}$ et $Ob = E$ est Oc en retard sur Oa d'un quart de phase. Cette même différence existe entre les courants secondaires. De plus il est facile de comprendre qu'avec des nombres de spires convenablement établis pour les deux bobines primaires, on peut obtenir l'égalité des deux tensions secondaires : on a donc des *courants diphasés*.

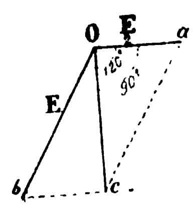


Fig. 557.

Système monocyclique. — Cette combinaison spéciale consiste à faire partir de l'alternateur monophasé lui-même ou encore d'une sous-station un courant décalé sur le principal et cela dans le but de faciliter le démarrage des moteurs insérés sur la ligne.

1° Lorsque le circuit auxiliaire part de la génératrice même, on dispose sur l'induit un bobinage spécial destiné à la production d'un courant décalé d'un quart de période sur le courant principal. Cet enroulement 3 a pour extrémité (fig. 558) le milieu O du fil ordinaire 1, 2 ; son autre bout est relié à un point III qui constitue la *troisième borne* de l'alternateur si l'induit est fixe ou qui communique avec une *troisième bague* dans le cas contraire. Nous obtenons ainsi trois ponts I-II, II-III, et III-I. La construction géométrique indiquée (page 420) nous permet de composer, dans les deux derniers, les f. é. m. développées soit 2-O et O-3 dans II-III et nous

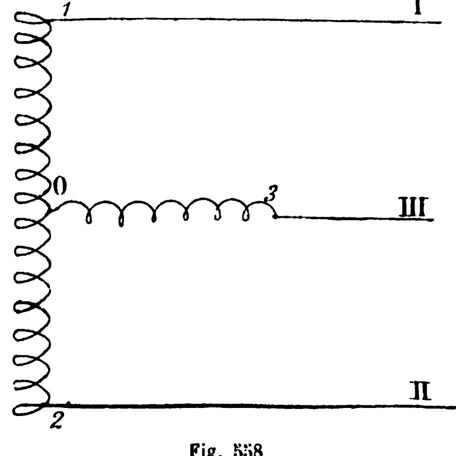


Fig. 558.

obtenons aisément ainsi les décalages de ces deux circuits; ils dépendent des valeurs des f. é. m. induites dans les fils 1-2 et 3 et l'on peut régler les nombres de spires de ces parties pour que les courants, pris sur les trois ponts, présentent la disposition triphasée.

2° Le fil auxiliaire ou *de démarrage* peut encore partir d'une sous-station (fig. 559) Le courant *monophasé* émanant de l'usine centrale arrive à la sous-station et, après son passage dans le transformateur statique T, il alimente un transformateur rotatif M d'où partent trois fils I, II et III.

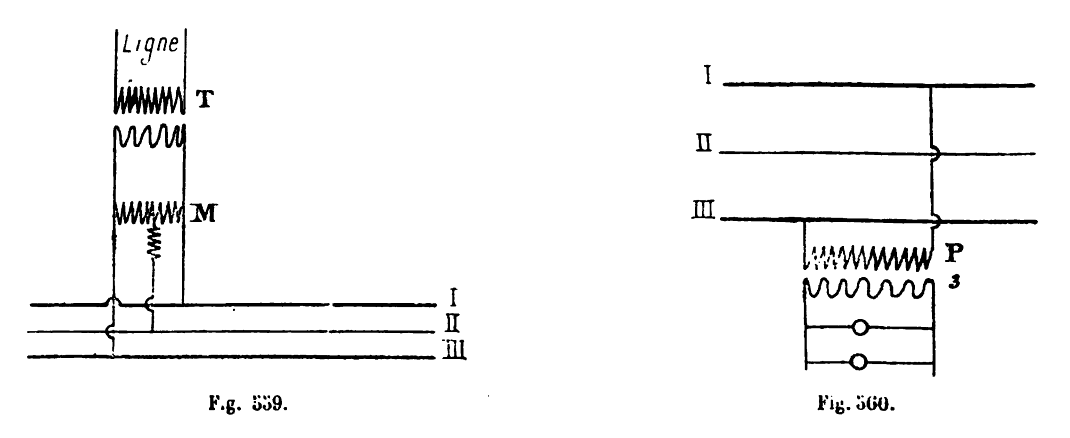


Fig. 559. Fig. 560.

L'*emploi* de ces courants spéciaux est facile à concevoir :

1° Supposons qu'on ait à desservir des lampes (fig. 560); on reçoit le courant pris sur les conducteurs principaux I et III dans le primaire P du transformateur et le fil de démarrage n'a aucun rôle.

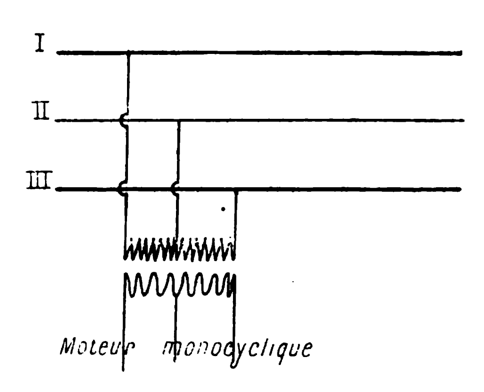


Fig. 561.

2° Pour des moteurs au contraire, nous faisons usage des trois ponts (fig. 561).

DIXIÈME PARTIE

ECLAIRAGE ELECTRIQUE

CHAPITRE PREMIER

ARC ÉLECTRIQUE

Il y a actuellement deux manières pratiques de faire servir l'énergie électrique à l'éclairage :

1° Par l'arc établi entre deux conducteurs voisins, comme on va l'indiquer d'abord ;

2° Par l'incandescence d'un fil traversé par le courant.

Description de l'arc. — Le phénomène a été observé pour la première fois par Davy, en 1813 ; ce physicien, en possession d'une pile de 2.000 éléments Volta, eut l'idée de faire passer le courant entre deux baguettes de charbon de bois, au contact d'abord, puis écartées progressivement. Il vit alors entre les deux conducteurs, une sorte de flamme légèrement courbe, d'où le nom d'*arc électrique* qui a été conservé.

Le passage de l'électricité à travers la séparation des deux conducteurs se fait avec le concours du carbone vaporisé à la très haute température de l'arc. Cette matière est transportée dans le sens du courant, c'est-à-dire du charbon *positif* au charbon *négatif* et il y a, en même temps que de la *vapeur*, des *parcelles solides* de charbon qui émettent une grande quantité de lumière. Les baguettes sont aussi très lumineuses ; on a trouvé qu'elles fournissent les 95 centièmes environ de l'intensité totale

de la source. Dans cette fraction considérable, la plus grande part revient au charbon positif qui éclaire 8 à 9 fois plus que l'autre conducteur.

Le phénomène de l'arc se présente aussi bien dans le vide ou dans les gaz inertes que dans l'air. Seulement les apparences varient d'un cas à l'autre.

Dans le vide, ou d'une manière générale quand le charbon ne peut pas brûler, il y a simplement transport de matière d'un pôle à l'autre : il s'ensuit que le crayon positif se creuse en s'usant rapidement; l'autre reçoit le depôt et s'accroit, au contraire, dans une certaine mesure. La couche gazeuse, qui s'étend d'un charbon à l'autre, est assez bonne conductrice pour assurer le passage de l'électricité.



Fig. 562.

Dans l'air, les phénomènes se compliquent par la combustion du carbone, la teinte varie et une véritable flamme apparait, réunissant les conducteurs. L'usure est alors beaucoup plus rapide. Le charbon positif se creuse en forme de coupe et c'est là la portion lumineuse par excellence; le charbon — s'arrondit au contraire. Pour observer ces apparences, on met devant l'arc un système réfringent qui projette, sur un écran, l'image des charbons et de l'arc. La figure 562 montre l'aspect du phénomène.

On remarque, si l'on donne aux deux conducteurs le même diamètre, que l'usure du charbon positif est deux fois plus rapide que celle du négatif en courant continu. Il n'en est plus de même évidemment si on alimente l'arc de courants alternatifs; les deux charbons s'usent alors également vite et il n'y a plus de cratère.

L'examen spectroscopique indique une émission de toutes les radiations lumineuses et des radiations chimiques en quantité considérable.

Constantes du courant nécessaire à l'arc. — On peut chercher au moyen de différences croissantes de potentiel, la tension continue nécessaire au maintien de l'arc; l'expérience a montré qu'il faut de 35 à 50 volts entre les deux charbons pour obtenir un arc ordinaire. On peut bien provoquer le phénomène sous 25 à 30 volts, avec une toute petite distance entre les charbons, mais il n'est pas ordinairement durable dans ces conditions. Entre 30 et 35 volts, on n'obtient rien. En courants alternatifs le voltage demandé est un peu moindre et l'on peut alimenter un arc avec une tension de 30 à 35 volts.

Cette tension nécessaire montre que l'arc oppose au courant une force contre-électromotrice e dont la valeur dépend de l'écart des deux baguettes sans qu'il y ait d'ailleurs proportionnalité entre la tension et la distance l. On écrit généralement

$$e = a + bl$$

équation dans laquelle a et b sont deux constantes. Il ressort de là que le voltage nécessaire est d'autant plus considérable que l'arc présente une plus grande longueur.

Quant à l'*intensité* du courant employé elle est variable. Selon sa valeur, la quantité de lumière émise est plus ou moins considérable et il existe une relation entre l'intensité lumineuse P et l'intensité du courant. M. Palaz, de Lausanne, a donné à cette relation la forme suivante, qui suppose une alimentation sous 50 volts

$$P = 0{,}035\ (200\,i + 4\,i^2)\ \text{carcels}$$

où i est l'intensité du courant électrique en ampères, P l'intensité lumineuse sphérique moyenne.

Nous avons indiqué la force électromotrice et l'intensité. Souvent on envisage une troisième donnée : le quotient de la différence de potentiel par l'intensité du courant; c'est ce qu'on désigne sous le nom de *résistance apparente* de l'arc.

Nature et dimensions des charbons. — A l'origine, Davy eut recours au charbon de bois; cette substance a été remplacée ensuite par le charbon extrait des cornues à gaz, beaucoup plus conducteur et s'usant moins vite que le premier. Actuellement on emploie toujours des agglomérés, dont la base est un charbon quelconque, charbon des cornues, charbon de coke de pétrole, etc. Voici les principes de cette préparation: Supposons le dépôt recueilli dans les cornues à gaz; cette matière, détachée de la paroi, est souillée: du côté interne par du coke, du côté externe par les silicates pris aux cornues. On commence pas la débarrasser mécaniquement de ces impuretés. Puis le corps est réduit en fragments et broyé en poudre fine (il faut alors enlever, au moyen d'un électro, le fer introduit par les outils dans la masse). On malaxe à chaud cette poudre avec du goudron. Puis, après un nouveau broyage sous des meules jusqu'à consistance voulue, et un pilonnage, on obtient une sorte de gros boulet, que l'on introduit dans un récipient très résistant muni d'une filière. La pâte sort sous une pression de 250 kilogrammes par centimètre carré; elle est coupée à la dimension voulue et réunie en paquets que l'on cuit dans des fours genre Siemens.

Les diamètres des charbons sont variables; ils dépendent de l'intensité consacrée à l'arc, de façon à modérer l'usure de ces conducteurs. Voici quelques nombres indiquant, en regard des intensités de courant, les diamètres des charbons:

I = 2 à 3	ampères	d = 2	millimètres
4 à 5	—	4	—
5	—	5	—
8	—	7	—
10	—	9	—
12	—	10	—
15	—	11	—
20	—	14	—
30	—	16	—
40	—	18	—

Pour des intensités plus grandes encore, on adopte ordinairement des faisceaux conducteurs.

Ces dimensions n'ont d'ailleurs rien d'absolu et on les modifie souvent; si l'on veut assurer aux charbons une grande durée, on doit accroître la section; au contraire, si la question de durée n'est qu'accessoire, on a intérêt à réduire le diamètre car la lumière gagne en intensité.

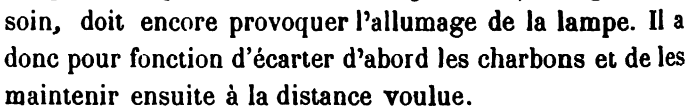
Les deux charbons sont souvent de sections différentes. Nous avons dit qu'à sections égales, le positif s'use deux fois plus rapidement que le négatif. Souvent on établit, entre les deux crayons, une différence de diamètre dans le but de diminuer l'inégalité d'usure.

Quand on emploie des charbons de dimension appropriée, on doit compter sur une consommation de 5 centimètres environ par heure, pour les deux réunis. Afin d'économiser les baguettes, on a eu l'idée de les métalliser ; on les recouvre de cuivre ou de nickel. Les charbons cuivrés durent plus longtemps que les charbons nus. Le nickel, qui n'est pas encore employé d'une manière courante, dans ce cas, prolonge de 50 % la durée des crayons.

Souvent on donne au charbon une disposition spéciale ; ce n'est pas un conducteur ordinaire, mais il présente, suivant son axe, une partie creuse dans laquelle on introduit une pâte à base d'hydrocarbures. Son rôle est de maintenir l'arc dans une position invariable. Les charbons, munis de cette particularité, sont dits *charbons à âme* ou *à mèche*. Ils sont employés le plus souvent comme *positifs*, alors que les négatifs sont constitués par des charbons homogènes.

Régulateurs. — Les charbons se consument pendant le fonctionnement de l'arc et par suite, les pointes s'écartent l'une de l'autre. A un moment donné, la force électromotrice disponible est insuffisante pour le passage de l'électricité et la lumière s'éteint.

Il faut donc, si l'on veut assurer la marche régulière de l'appareil, rapprocher automatiquement les deux charbons pour compenser l'usure. Le *régulateur*, chargé de ce soin, doit encore provoquer l'allumage de la lampe. Il a donc pour fonction d'écarter d'abord les charbons et de les maintenir ensuite à la distance voulue.



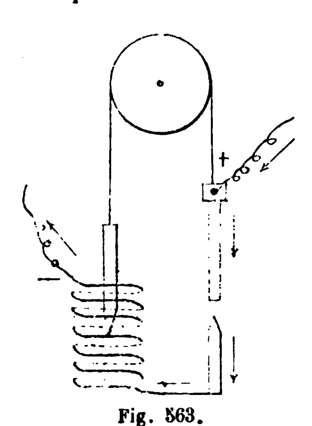


Fig. 563.

La régulation peut porter sur plusieurs points:

1° Sur l'intensité du courant utilisé ;

2° Sur le voltage entre les deux charbons ;

3° à la fois sur l'intensité et la tension.

1° Si l'on a un arc *à intensité constante*, on fait passer le courant à travers une bobine à fil gros et court qui agit sur un noyau magnétique. Cette pièce de fer mobile entraine, dans ses mouvements, le charbon supérieur. On voit (fig. 563) le schéma d'un régulateur de ce genre: le

noyau magnétique a une forme spéciale, amincie à un bout, de manière qu'il soit en quelque sorte aspiré par le solénoïde d'autant plus fortement que le courant est plus intense. La pièce de fer et le porte-charbon mobile s'équilibrent, quand le courant normal traverse l'arc et la bobine, aux extrémités d'une cordelette qui passe sur un renvoi. A l'extinction, l'action électro-magnétique n'existe pas et les deux crayons sont au contact; mais dès que l'électricité est lancée dans la lampe, la bobine agit sur son armature et sépare les deux charbons. Supposons que l'intensité du courant subisse une diminution par suite d'une longueur exagérée de l'arc; le solénoïde laisse un peu remonter son armature et les deux conducteurs se rapprochent.

Un tel régulateur est propre à fonctionner seul sur un circuit; il est *monophote*. Si on en plaçait plusieurs, deux par exemple, sur une distribution à potentiel constant, le mécanisme serait en défaut, car l'intensité du courant pourrait avoir la valeur convenable pour des longueurs très inégales des deux arcs; il suffirait que l'excès de résistance de l'un égalât le défaut de résistance de l'autre;

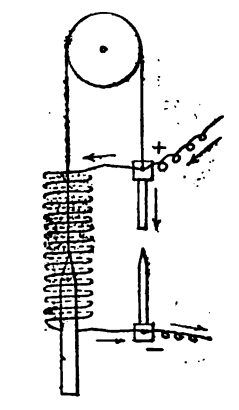


Fig. 564.

2° On maintient, entre les deux pointes des charbons, une *tension invariable* en mettant en dérivation une bobine très résistante. L'intensité du courant qui traverse ce conducteur est proportionnelle à la différence de potentiel consommée par l'arc. Si cette différence augmente (par le fait d'un allongement de l'arc dû à l'usure), le courant dérivé subit aussi un accroissement que l'on peut utiliser par son action sur le noyau magnétique. La figure schématique 564 montre comment se fait le rappel des charbons; elle nous rend compte aussi du procédé d'*allumage* : les charbons peuvent ne pas être au contact, le courant intense alors dans la bobine provoque le rapprochement des deux baguettes et, quand les deux se touchent, cette intensité diminue ce qui amène immédiatement la séparation des charbons et la formation de l'arc.

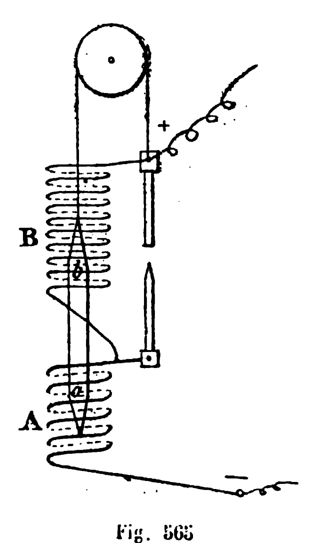


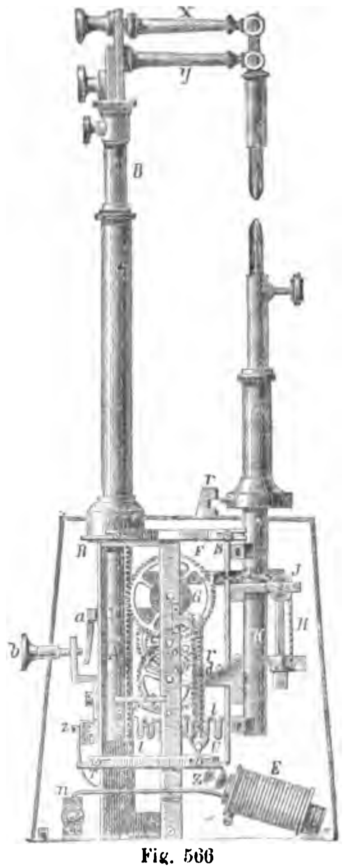
Fig. 565

3° Dans le troisième groupe de régulateurs, il s'agit de rendre *constante* la *résistance apparente*. On utilise pour cela les deux modes précédents combinés. Il y a deux électros (fig. 565), l'un à gros fil A, l'autre B à fil résistant; le premier est dans le circuit même de l'arc; le second se place en dérivation. Ces deux bobines sont dans le prolongement l'une de l'autre et un noyau de fer occupe leur axe; les actions exercées par les deux enroulements sur le métal magnétique sont opposées; l'une tend à régler le potentiel, l'autre agit sur l'intensité. Il résulte de là la possibilité d'établir un rapport constant entre les deux grandeurs e et i. Ce système est appelé *différentiel*.

A ces deux dernières classes se rattachent les régulateurs appelés *polyphotes* parce qu'ils peuvent se placer en série en nombre aussi considérable qu'on le veut.

Comme type de régulateur monophote, nous parlerons de l'appareil Serrin, l'un des premiers construits.

Régulateur Serrin. — Les deux porte-charbons sont mobiles et se dirigent l'un vers l'autre. On emploie comme moteur le support du charbon + qui est pesant; il est formé (fig. 566) d'une tige A et d'une potence *xy*; la tige coulisse dans une colonne creuse B et entraine avec elle le charbon négatif au moyen du système suivant: le bas de la tige est muni d'une crémaillère engrenant avec le pignon F. Sur l'axe de cette roue est montée une poulie G de diamètre égal à la moitié de celui de l'engrenage, et une cordelette s'enroule sur G pour aboutir, après son passage sur le renvoi J, à une pièce fixée au porte-charbon négatif, relativement léger. Le système, en l'absence de tout autre organe, se met donc en mouvement jusqu'à ce que les deux charbons se touchent; de plus, on remarque que la descente du charbon + est deux fois plus rapide que l'ascension du charbon — (dans le but de maintenir le point lumineux à une hauteur invariable).


Fig. 566

Nous avons maintenant à nous occuper du système d'allumage et de réglage.

Étant donné que les charbons tendent toujours à se rapprocher, il faut, pour allumer, provoquer un écart des conducteurs et ensuite, pour régler, empêcher tout déplacement, jusqu'à un moment donné. Quand l'allongement de l'arc est suffisant, le mouvement doit être libéré juste le temps nécessaire à la compensation de l'usure.

On maintient l'écart en agissant sur une roue étoilée, que la figure 566 représente en *e*. C'est le dernier rouage d'un système d'horlogerie dont le premier mobile est F. Cette étoile tourne avec une grande vitesse quand les charbons se déplacent; mais une équerre *d*, qui fait corps avec le tube K du porte-charbon négatif, s'oppose à la rotation quand l'intensité du courant est suffisante dans l'arc, car elle descend par l'attraction d'un électro et s'engage dans les dents du rouage. Le tube K (qui suit les mouvements descendants de son porte-charbon) est, en effet, fixé aux côtés SU d'un double parallélogramme articulé R S U T (les points R et T sont fixes). Une armature de fer est mise en Z et se trouve en face d'un électro-aimant E à gros fil alimenté par le courant de l'arc. Ce courant tend donc à faire baisser le côté S U et, par suite, le tube K et le

charbon —; des ressorts antagonistes tirent vers le haut les mêmes parties mobiles.

Supposons l'appareil à l'extinction; les crayons sont forcément au contact, car en l'absence du courant, les ressorts soulèvent le cliquet *d* et libèrent le mouvement d'horlogerie. Faisons passer l'électricité dans la lampe; le débit est très intense d'abord, car la force contre-électromotrice n'existe pas; l'armature est vivement attirée vers le bas; elle abaisse le charbon négatif de la longueur nécessaire à la fois à l'établissement de l'arc et à l'embrayage de la roue étoilée (une vis de butée limite cet écart). Il en résulte que la distance établie reste acquise: la lampe est allumée.

Mais les charbons s'usent; la longueur de l'arc devient trop grande et l'intensité décroît: le parallélogramme déformable est abandonné à l'action alors prédominante des ressorts, et le système d'horlogerie, remis en liberté quand l'équerre se soulève, permet aux crayons de se rapprocher jusqu'au moment où l'intensité revient en état d'arrêter ce mouvement; le réglage est ainsi obtenu par une série de déplacements séparés par des intervalles de repos.

Nous ne décrirons que trois types de régulateurs, à titre d'exemples.

Régulateur Gramme. — C'est celui que nous choisirons comme type des appareils à potentiel constant.

Ici encore le moteur est le poids du charbon supérieur fixé à une tige massive D portant une crémaillère engrenant avec un pignon, qui est le premier rouage d'un système d'horlogerie. Le dernier mobile est une roue étoilée. En temps ordinaire, un cliquet empêche le mouvement. Quant au charbon inférieur, il est porté par un cadre OEGE et maintenu contre l'autre charbon par deux ressorts R R.

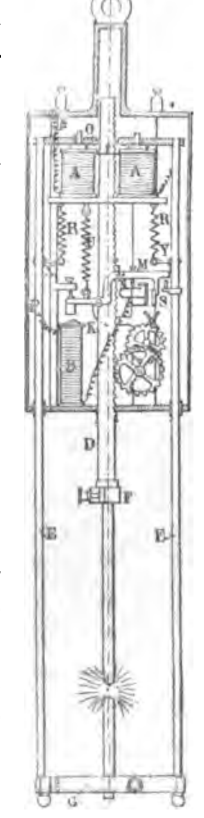


Fig. 567.

L'allumage se produit par l'action de l'électro A à gros fil intercalé dans le circuit principal; le passage du courant détermine la descente de l'armature O, d'où une séparation des deux crayons. Le réglage va consister à donner et à maintenir aux charbons un écart convenable. On emploie, à cet effet, le solénoïde B à fil long et fin placé en dérivation sur le circuit de l'arc, et agissant sur l'armature fixée à l'extrémité du levier LM. Si le courant ne passe pas, le levier obéit au ressort U et l'encliquetage empêche les déplacements. Mais, par suite de l'usure des charbons, la dérivation reçoit une quantité croissante d'électricité et le cliquet finit par se soulever en déclenchant les rouages; alors le charbon supérieur descend jusqu'au moment où la force électromotrice a repris sa valeur normale entre les conducteurs; le levier revient alors à sa position et embraye, par son extrémité, la roue étoilée du système d'horlogerie.

Le dispositif décrit pourrait permettre aux pièces mobiles des mouvements trop étendus. On évite cet inconvénient en intercalant,

dans le courant dérivé de l'électro B, une lame courbe N et une vis M, qui se touchent quand le levier est horizontal. Dès que l'armature L est attirée, le contact est détruit et, par suite, cesse également le courant qui alimente le solénoïde. Le système mobile n'est donc libéré qu'un instant. Mais un nouvel effet semblable peut suivre le premier quand M et N se touchent de nouveau, et ainsi de suite. Au lieu d'un mouvement continuel de descente, on a une série de déplacements imperceptibles qui donnent à la lumière plus de fixité.

Régulateur Pilsen. — Cette lampe, extrêmement simple au point de vue mécanique, est très répandue. Elle est représentée, dans son ensemble, par la figure 568. C'est un régulateur différentiel. Chaque électro A et B agit sur un noyau de fer de forme allongée *a* et *b* (fig. 569). Les deux armatures sont reliées par une cordelette

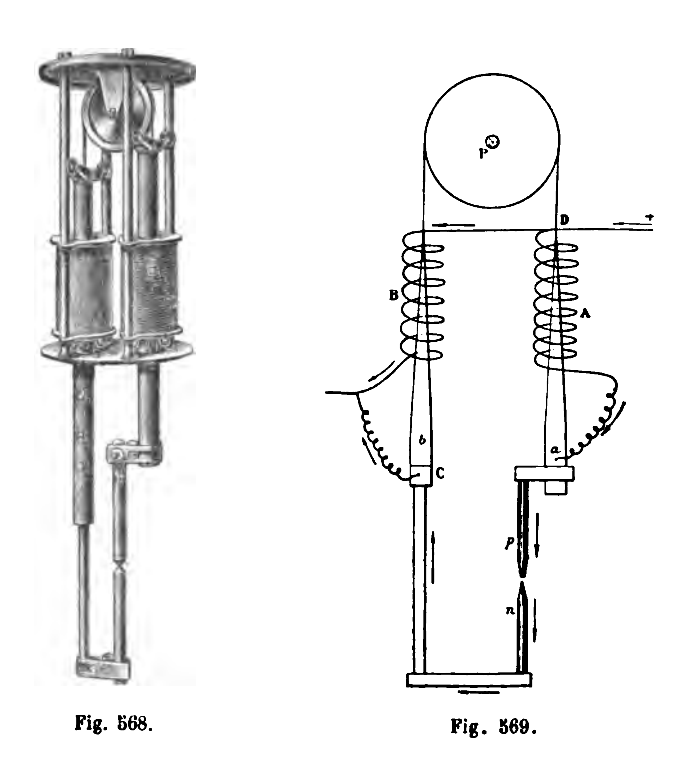


Fig. 568. Fig. 569.

passant sur la poulie P, et les attractions ont lieu vers la partie supérieure; elles sont donc antagonistes. On voit nettement, sur la figure théorique, la marche du courant principal entre le point marqué + et celui qui porte le signe —; la dérivation, prise entre les deux charbons ou, pratiquement, entre les points C et D, alimente le solénoïde B, à fil long et fin. On voit aussi comment sont fixés les charbons: chacun est solidaire d'un des noyaux d'électro. Pendant l'extinction de la lampe, les deux crayons se touchent (les poids des porte-charbons sont disposés dans ce but).

Dès que le courant passe, l'action de la bobine A provoque l'ascension du noyau *a*

et fait descendre l'autre charbon. L'arc peut alors s'établir et la distance des baguettes a une certaine valeur. Par suite de l'usure, l'intensité du courant principal diminue pendant que celle de la dérivation subit une augmentation ; il en résulte une attraction prédominante de *b* et une action moins forte sur *a*, d'où un rapprochement des charbons; l'arc conserve une longueur invariable. A cette longueur correspondent des actions attractives égales des deux solénoïdes sur leurs noyaux.

Si l'on veut que le point lumineux reste fixe, il suffit de donner au charbon supérieur une section double de celle du charbon inférieur.

Cette lampe Pilsen se construit pour des débits variant de 2 à 100 ampères.

Si le régulateur doit être placé seul sur une dérivation, il faut compter une différence de potentiel de 52 volts aux bornes. Si on fait des groupes de deux, il faut fournir 100 volts à chaque série. On peut encore disposer trois lampes sur 110 volts.

Il est souvent utile de disposer en tension un grand nombre d'arcs. La maison Fabius Henrion produit, pour ce cas particulier, une modification de la lampe Pilsen. On trouve dans ce régulateur, en plus des organes ordinaires : 1° Quelques tours de gros fil placés sur la bobine en dérivation; 2° Un dérivateur D destiné à rendre les lampes indépendantes; 3° Un contact pour la mise en court-circuit en cas d'accident; 4° Une clef d'extinction *c*(fig. 570.).

Si les charbons ne se touchent pas au moment où le courant est envoyé dans les lampes, l'électricité trouve un chemin à travers les spires supplémentaires de S', le contact *ad* et la résistance R : le charbon inférieur remonte et le courant peut former l'arc ; mais alors il va au dérivateur D et, en attirant l'armature *a*, il rompt le contact. L'électricité traverse la bobine à gros fil, comme dans les lampes ordinaires; quant à la dérivation, elle est prise (la figure l'indique) entre les points *b* et *f*; elle emprunte donc les quelques spires de gros fil de S' qui n'ont plus maintenant de rôle spécial.

En cas d'accident ou par suite d'usure des charbons, un contact s'établit en *d*, et le courant passe directement d'un pôle à l'autre à travers la résistance R.

Enfin le rôle de la clef *c* est de réunir les deux bornes en court-circuit si on veut éteindre la lampe. Ces régulateurs se mettent jusqu'à 60 en tension.

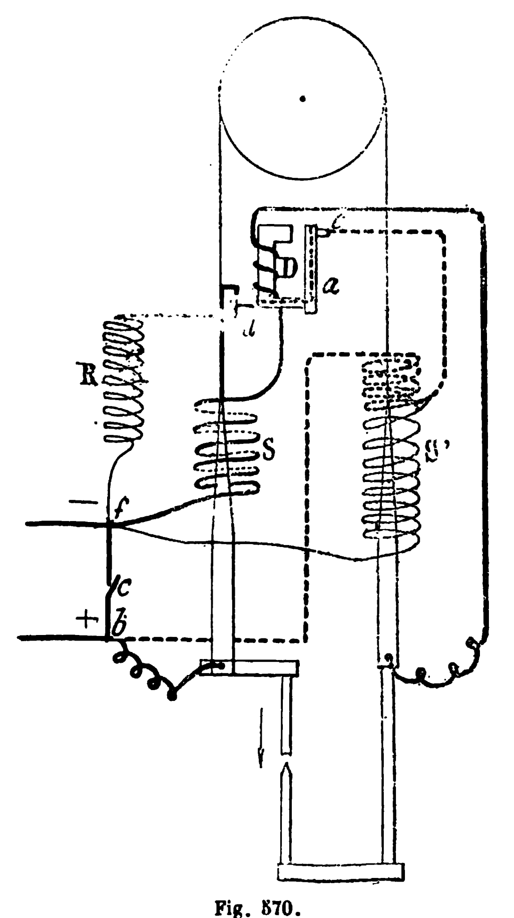


Fig. 570.

Lampe Bardon.— Nous décrirons sommairement le modèle *différentiel à recul.* Cette lampe est représentée par les deux figures 571 et 572.

Le moteur est le porte-charbon supérieur S solidaire de l'inférieur I par l'intermédiaire d'une cordelette, d'extrémités $e\,e'$ passant sur deux galets P P' et sur la roue à gorge g qui fait corps avec le volant V ; un frein F agit sur ce volant.

Les chapes des galets sont fixées à un cadre rigide, mobile autour de XX, en deux points a et c situés de part et d'autre de l'axe. Quant aux déplacements du cadre, ils

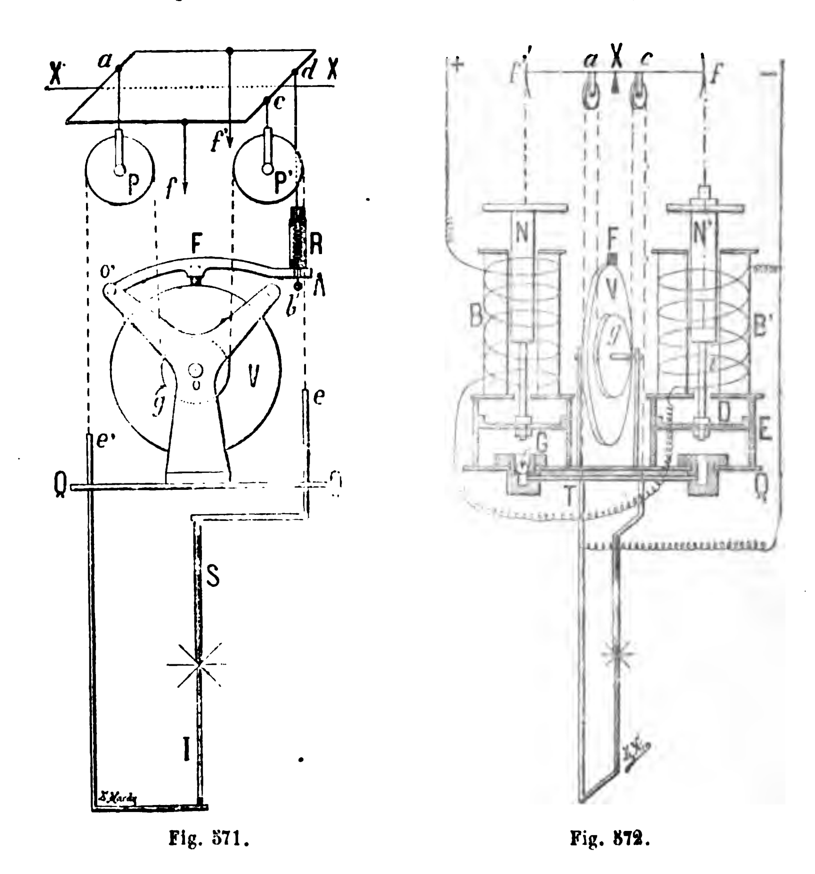


Fig. 571.

Fig. 572.

sont dus à deux forces f et f' exercées par les électros de réglage.

On voit en outre en R un ressort qui maintient le serrage du frein sur la roue tant que l'extrémité A du levier n'est pas soulevée par la butée b' commandée par une tige $b'd$.

La figure 572 montre les deux bobines : B en série sur l'arc, B' en dérivation.

Quand la lampe n'est pas en service, les charbons sont au contact. En effet le noyau N' *lesté* agit suivant f; le cadre s'incline vers f, et le volant est libéré du serrage F.

Allumage. — Le passage du courant dans B produit une force f' qui fait basculer le cadre en sens contraire du sens précédent et il en résulte :

1° Que le volant V est bloqué ;

2° Une ascension de *c* et une descente de *a* d'où l'écart des charbons et la formation d'un arc (d'abord un peu trop long),

Réglage. — Cette longueur se règle ensuite par l'action différentielle de la bobine B' qui diminue progressivement l'inclinaison du cadre jusqu'à le renverser en sens contraire. Pendant ce temps l'arc se raccourcit, et par le jeu du mécanisme dit de *recul.* Quand l'inclinaison, dans le sens actuel, est assez grande, le frein se soulève et le rapprochement des charbons s'effectue jusqu'à ce que l'intensité ait repris sa valeur normale.

Le réglage par le *frein* compense donc l'*usure régulière* des charbons, tandis qu'une augmentation anormale d'intensité (impuretés des crayons par exemple) est corrigée par le mouvement de *recul.*

L'apériodicité des oscillations est obtenue, comme le montre la figure 572, par deux pompes à air, solidaires des noyaux, et dont les cylindres communiquent; une bille, formant clapet en G, permet le relèvement *rapide* de N (*écart des charbons*) mais *ralentit* considérablement le mouvement contraire (*rapprochement des crayons*).

Cette lampe, grâce à une légère modification des noyaux et des enroulements peut être alimentée de courants alternatifs.

Alimentation des régulateurs. — On peut employer des courants continus ou alternatifs. Il y a ordinairement peu de différence entre les lampes qui fonctionnent avec les uns et avec les autres.

Pour courants alternatifs, les noyaux d'électro sont ordinairement feuilletés, dans le but d'éviter les effets de Foucault. Les enroulements dérivés dépendent aussi alors de la fréquence adoptée.

Ainsi que nous le verrons plus loin, les régulateurs, comme tous les appareils d'utilisation de l'électricité, se disposent en dérivation ou en tension. Dans le premier cas, il est indispensable de mettre sur chaque circuit, qui contient une seule lampe, une résistance appropriée dite *résistance additionnelle.* C'est un rhéostat comprenant quelques touches seulement et un petit nombre de segments de fil. Son influence est double :

1° Au moment de l'allumage, il empêche la lampe d'être mise en trop court-circuit quand les charbons sont au contact. Le même effet se produit encore pendant le fonctionnement, en cas d'accident, si les baguettes viennent à se réunir;

2° Il joue le rôle de régulateur jusqu'à un certain point. En effet, en supposant au rhéostat une résistance invariable R, on obtient une chute de potentiel *e* égale à RI si l'intensité est I. Cette chute est d'autant plus considérable que le débit est plus fort et, par conséquent, si l'intensité tend à s'exagérer, la résistance additionnelle fait décroître le voltage entre les deux charbons et diminue la consommation de l'arc. D'ailleurs, à mesure que ce conducteur s'échauffe, il devient plus résistant, ce qui contribue encore à faire baisser la différence de potentiel entre les crayons.

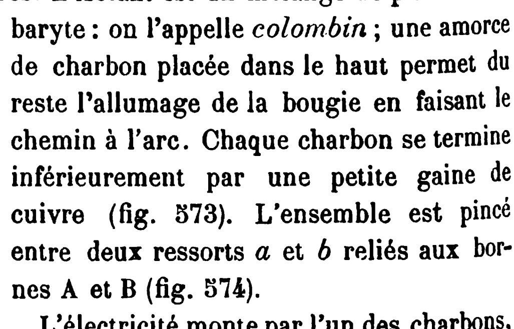
Souvent dans les distributions de ville, qui se font à 110 volts, on met deux arcs en tension. Une seule résistance additionnelle suffit pour les deux. On est même arrivé à disposer trois arcs sur 110 volts et, dans ces conditions, la même quantité de lumière coûte environ 30 % moins cher qu'avec des lampes par deux sur 110 volts. Avec une légère dépense supplémentaire (5 % environ) on parvient à augmenter l'éclairage de 80 %. Dans le cas où un grand nombre d'arcs sont disposés en série, les résistances additionnelles deviennent inutiles. Les divers régulateurs jouent ce rôle les uns par rapport aux autres.

Bougies électriques. — Elles ont été imaginées dans le but de supprimer le mécanisme des régulateurs. Deux charbons parallèles séparés par un isolant quelconque dans toute leur longueur, sauf à leurs extrémités supérieures, constituent le système ; l'arc jaillit entre les deux pointes et se maintient à mesure que les crayons se consument. Mais l'appareil doit, pratiquement, satisfaire à plusieurs conditions :

1° Pour avoir la même usure dans les deux baguettes on emploie exclusivement les courants alternatifs.

2° L'arc ne doit se produire qu'à la partie supérieure des charbons. On y arrive en séparant les deux crayons d'un isolant vaporisable au fur et à mesure de l'usure par la chaleur même du foyer électrique.

La première bougie pratique est celle de Jablochkoff; les deux baguettes ont 4 millimètres de diamètre; leur séparation est de 3 millimètres environ et leur hauteur de 30 centimètres. L'isolant est un mélange de plâtre et de baryte : on l'appelle *colombin* ; une amorce de charbon placée dans le haut permet du reste l'allumage de la bougie en faisant le chemin à l'arc. Chaque charbon se termine inférieurement par une petite gaine de cuivre (fig. 573). L'ensemble est pincé entre deux ressorts *a* et *b* reliés aux bornes A et B (fig. 574).



L'électricité monte par l'un des charbons, forme l'arc et descend par l'autre conducteur.

La figure 575 montre une bougie avec sa monture et son globe.

La bougie, au point de vue du rendement lumineux, est inférieure aux régulateurs. Une certaine somme d'énergie est perdue, probablement à cause de la volatilisation continuelle du colombin. De plus cette substance manque forcément d'homogénéité et

Fig. 573

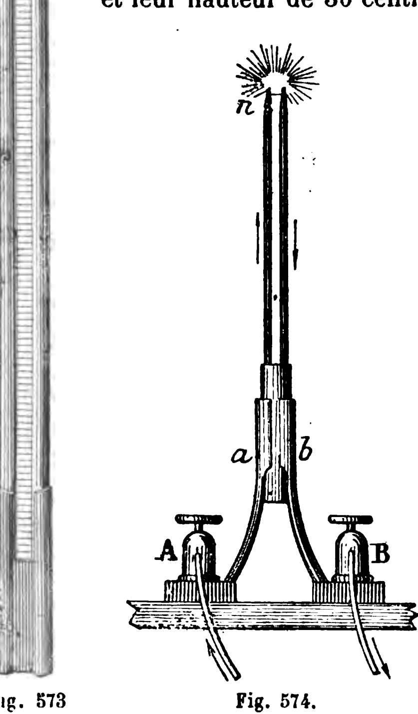


Fig. 574.

elle provoque des changements continuels d'éclat et de couleur de la lumière. Pour éviter ces inconvénients de l'isolant, on a cherché à supprimer cette substance ; plusieurs dispositions ont été indiquées dans ce but ; l'une celle de Jamin consistait à entourer la bougie d'un cadre ABC traversé par le même courant que l'arc. En vertu des lois de l'électro-dynamique, la lumière doit se maintenir à la partie voisine de B (fig. 576).

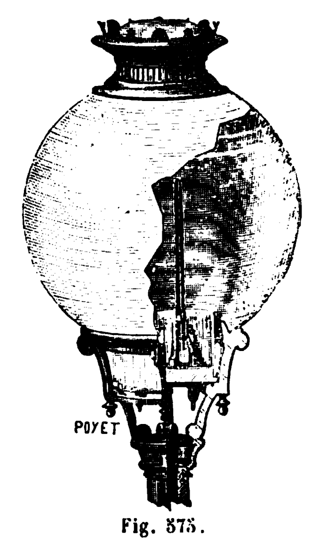


Fig. 575.

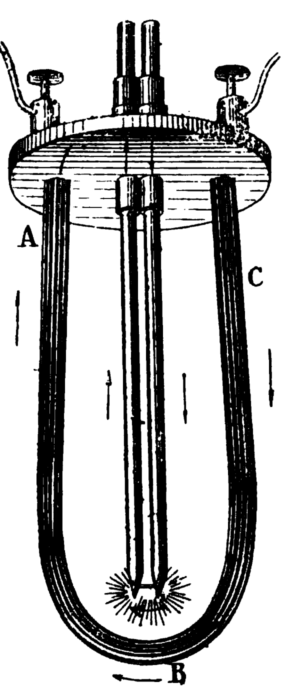


Fig. 576.

Un autre inconvénient grave est la faible durée : deux heures seulement pour des charbons de 30 centimètres. Si l'éclairage doit être prolongé plus longtemps, il faut opérer le remplacement de la bougie par une autre. Il en est de même si, pour une raison quelconque, l'une vient à s'éteindre avant sa combustion complète; sans amorce, elle ne peut pas s'allumer et une nouvelle bougie est nécessaire. Pour cette substitution, on a imaginé divers systèmes automatiques mais s'ils sont un peu compliqués, ils n'ont pas leur raison d'être car les bougies perdent leur avantage qui est l'absence de mécanisme.

Lampes à arc en vase clos. — Dans ce cas, la combustion des charbons ne peut avoir lieu par suite du manque d'oxygène ; il en résulte une usure beaucoup plus lente des conducteurs, ce qui permet aux constructeurs d'annoncer des lampes brûlant jusqu'à 200 heures sans renouvellement des charbons. On les alimente à un voltage de 110 environ.

Dans ces conditions, l'arc est notablement *plus long* dans ces lampes que dans les autres. Cette circonstance permet aux rayons lumineux issus du charbon supérieur un passage plus facile, ce qui donne un éclairage plus uniforme.

Nous décrirons rapidement deux modèles de lampes à arc en vase clos, le système *Jandus* et le *Marks*.

Lampe Jandus. — Elle est représentée en coupe (fig. 577).

L'arc se produit dans le manchon M fermé à sa partie inférieure et laissant passer le charbon négatif. A la partie supérieure un chapeau traversé par le charbon + laisse entrer une portion minima de comburant prise à l'atmosphère du gros globe qui lui-même s'oppose par une valve V à l'entrée de l'air. Dans ces conditions la com-

bustion est pour ainsi dire nulle car l'oxygène contenu dans le manchon, au moment de l'allumage, forme du gaz carbonique.

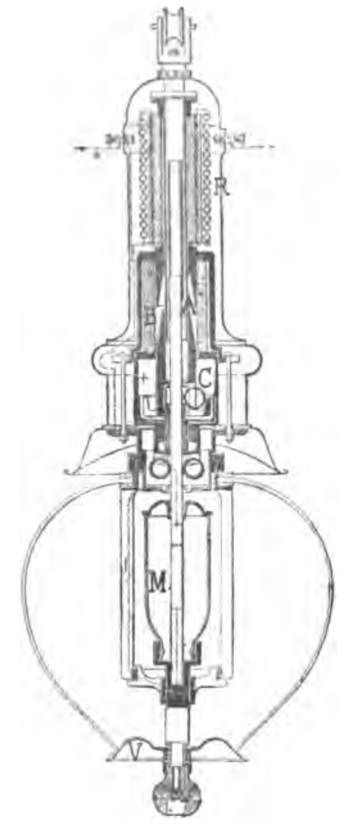


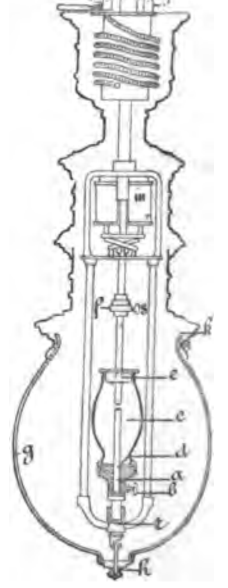
Fig. 577.

La bobine de réglage B, l'arc et le rhéostat R sont disposés *en série*.

Le charbon positif seul est mobile ; il reçoit le courant par plusieurs galets tournés qui le grippent en reposant d'autre part sur des plans inclinés. Les freins sont des pompes à air C et le noyau A de l'électro B est solidaire du piston des freins qui porte les galets de grippage. L'allumage se fait aisément : dès que le courant passe, le noyau est soulevé et l'arc s'établit.

Quant au réglage nécessité par l'usure des charbons, il est dû à l'ensemble des forces : pesanteur et action électromagnétique : cette dernière diminuant lorsque l'arc s'allonge, le noyau est relâché et l'ensemble descend. Un tube fixe, que l'on aperçoit en C, soulève alors légèrement les galets qui coincent le charbon et ce conducteur peut descendre sous l'action de son poids jusqu'à ce que l'intensité reprenne la valeur qui permet le relèvement de la partie mobile et le coinçage des galets.

Lampe Marks. — La figure 578 la représente. L'arc jaillit dans le petit globe réfractaire *c*, hermétiquement fermé en bas par une rondelle d'amiante *d* et bouché en haut par le chapeau métallique *e* formant obturateur. Dès que le courant passe dans les charbons et dans le double électro *m*, le porte-charbon supérieur est soulevé par le système articulé que l'on aperçoit au-dessous de *m* jusqu'à une hauteur qui est fonction de l'intensité. L'usure des crayons diminue cette intensité et provoque alors un desserrage des mâchoires d'où résulte un glissement de la tige porte-charbon supérieur jusqu'à rétablissement de la distance normale.


Fig. 578.

On voit, en haut de la lampe, la résistance additionnelle, réglée sur le voltage dont on dispose dans la canalisation, de manière à établir entre les charbons une tension de 85 volts environ.

CHAPITRE II

ECLAIRAGE PAR INCANDESCENCE

Principe. — Le principe de cet éclairage réside dans l'élévation de la température d'un fil traversé par un courant électrique. Nous avons vu (loi de Joule) que le dégagement de chaleur dans un conducteur de résistance R a pour expression

$$Q = A R I^2$$

A étant une constante et I l'intensité du courant.

Quand cette chaleur est suffisante pour porter le fil à l'incandescence, on a une source de lumière dont l'intensité dépend de la température atteinte et du pouvoir émissif de la substance.

Le problème de l'incandescence a été résolu pour la première fois par Edison, d'une manière pratique, au moyen de fils de platine enfermés dans une ampoule de verre. Mais cette solution n'est pas parfaite, car le corps utilisé doit remplir plusieurs conditions :

1° Être suffisamment résistant ;

2° Son pouvoir émissif doit avoir la plus grande valeur possible ;

3° Le corps a besoin d'être réfractaire et de posséder en même temps une certaine solidité pour qu'il ne se brise pas sous l'effort des dilatations et des déplacements imprimés à la lampe.

Le platine manque de résistance au point de vue électrique ; son point de fusion n'est pas suffisamment élevé.

Au lieu de platine, on emploie maintenant le charbon sous une forme convenable. On a là une matière bien plus résistante et en même temps douée d'un pouvoir émissif plus considérable.

Le filament est enfermé dans une enveloppe de verre dans laquelle le vide a été fait aussi parfaitement que possible pour éviter la combustion du conducteur.

Les diverses lampes que l'on trouve dans le commerce ne diffèrent que par le mode

de préparation du fil de charbon. Les procédés sont très nombreux et nous ne pourrons les indiquer.

Monture des lampes. — Ordinairement on adopte, pour le culot des lampes à incandescence, deux dispositions : *à baïonnette* ou *à vis*.

1° Le culot à baïonnette comprend, noyées dans une matière isolante, deux pastilles métalliques reliées aux extrémités du filament (fig. 579).

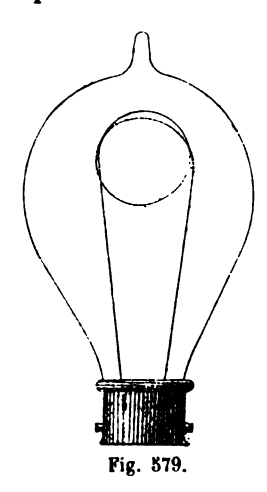


Fig. 579.

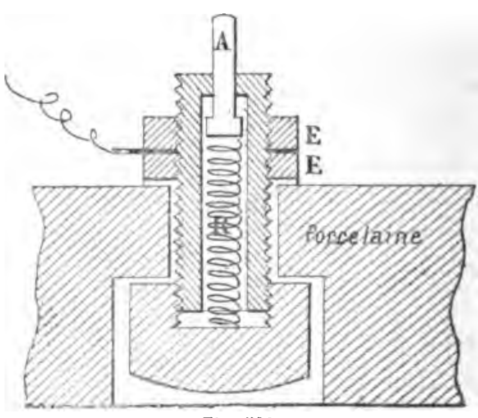


Fig. 580.

La figure 580 montre une disposition adoptée pour la douille des lampes à baïonnette; deux tiges A sont maintenues, au moyen de ressorts à boudin R, contre les pièces métalliques du culot des lampes. Le fil conducteur est serré entre les deux écrous E, E.

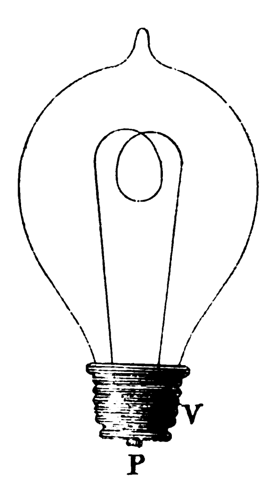


Fig. 581.

2° Dans la monture à vis, l'une des extrémités du filament aboutit à une vis V estampée dans une feuille de clinquant, l'autre à une paillette de laiton P placée au centre du culot (fig. 581) et ces deux parties sont d'ailleurs isolées l'une de l'autre par une matière coulée dans l'intervalle. La douille est garnie intérieurement d'une vis de laiton correspondant à celle de la lampe. A cette partie aboutit l'un des fils de la canalisation tandis que l'autre fil est relié à une pièce de métal faisant ressort au milieu de la monture. En vissant la lampe dans son support, on assure donc le contact entre les deux extrémités du circuit et celles du filament.

Quel que soit le genre de monture, on peut toujours munir la douille d'un clef permettant d'interrompre le courant dans la lampe. Les modèles employés sont assez variés.

Nature du filament. — Dans les lampes *Edison*, le conducteur est formé par des fibres, tirées de l'écorce de bambou et carbonisées dans un four. Généralement ces

fils de carbone manquent d'homogénéité ; pour leur communiquer cette propriété, on peut les *renforcer*, faire passer le courant dans ces conducteurs disposés dans un gaz hydrocarburé ; le charbon qui résulte de la décomposition vient se fixer là surtout où la température est la plus élevée, c'est-à-dire aux points amincis.

On soude ensuite les extrémités du conducteur à deux fils de platine; le mode de soudure est variable : on emploie tantôt une pâte au carbone, tantôt un composé hydrocarburé que l'on décompose par électrolyse. Les fils de platine passent à travers un tube de cristal aplati sur ces conducteurs et se terminent par les pastilles métalliques noyées, comme nous l'avons dit déjà, dans une matière isolante qui garnit le culot. Le tube de cristal se soude ensuite à l'ampoule qui contient le filament.

Il reste à faire le vide dans la lampe au moyen d'une tubulure ménagée à cet effet. Cette opération est menée aussi loin que possible et se termine ordinairement par la pompe à mercure. Mais il ne suffit pas de soutirer tout l'air de l'ampoule; il faut encore extraire le gaz que le filament peut contenir dans ses pores. Si l'on omettait cette opération, le gaz emprisonné sortirait du fil à chaque incandescence et serait réabsorbé à l'arrêt de la lampe; il résulterait de ces alternatives une usure rapide du conducteur. L'extraction de ce gaz se fait aisément : il suffit de maintenir l'action de la machine pneumatique pendant que l'on échauffe le fil au moyen du courant.

L'opération terminée, il reste à fermer la tubulure de l'ampoule et à soumettre ensuite la lampe aux essais et à l'étalonnage.

Quand on la livre au commerce, la lampe porte deux chiffres :

1° L'un indique le nombre de *bougies décimales* que la source peut donner, quand elle est alimentée à son voltage normal (les valeurs ordinairemant admises sont de 8, 10, 16, 25, 32 bougies);

2° Le second nous renseigne sur ce voltage normal ; les différences de potentiel utilisées le plus souvent sont 55, 70, 100, 110, 150, 220 volts.

Ainsi soit, par exemple, une lampe marquée 16/110; nous saurons qu'elle est destinée à fonctionner sur un circuit à 110 volts et de plus que son pouvoir éclairant est de 16 bougies.

Les lampes de *Swan* étaient formées d'un faisceau de fibres de coton traité d'abord par l'acide sulfurique destiné à communiquer à ces fils de l'élasticité, puis carbonisé ensuite.

Celles de *Cruto* utilisaient un fil de charbon façonné à la filière au moyen d'une pâte convenable, carbonisé et renforcé ou encore un dépôt électrolytique de carbone sur un fil de platine.

Actuellement les filaments de lampes à incandescence sont généralement filés et on les carbure ensuite automatiquement jusqu'à ce que la résistance tombe à la valeur qu'on s'est fixée à l'avance.

Dans toutes ces lampes, le conducteur est en charbon et sa résistance, d'autant plus grande, entre certaines limites, que l'alimentation doit avoir lieu à plus haut voltage, dépend évidemment de sa longueur et de sa section. En modifiant ces deux données,

on a donc pu obtenir des lampes de bas voltage, 5, 10, 15, 20 volts, destinées à des usages spéciaux. D'un autre côté, quand il s'agit de dépasser le voltage 200 ou 220, la grande conductivité du carbone devient un obstacle car on se trouve dans la nécessité d'allonger et d'amincir le filament d'une façon démesurée.

On a imaginé des systèmes nombreux de filaments; parmi eux citons :

1° Un fil de coton immergé dans une solution de nitrate de terre rare et d'un sel difficilement fusible, iridium, par exemple ; séchage et flambage ensuite ;

2° La lampe électrique *Auer* : fil d'osmium, métal pratiquement infusible, support d'oxydes de thorium et de cérium ; elle est destinée à de bas voltages ;

3° Une lampe Edison aux oxydes de zirconium et de thorium ;

4° Un filament de thorium en poudre fine, moulé sous haute pression puis oxydé superficiellement par incandescence du conducteur dans un liquide oxydant ;

5° Agglomérés d'oxydes métalliques appropriés avec de la cellulose dissoute dans du chlorure de zinc. Les filaments s'obtiennent par compression ; une calcination transforme la cellulose en charbon amorphe, puis le passage d'un courant donne enfin au charbon un aspect graphitique en même temps qu'une haute densité.

Citons encore parmi les lampes qui nous occupent le type *Cooper Hewitt* qui repose sur l'incandescence des vapeurs mercurielles enfermées dans un tube.

Fonctionnement des lampes à incandescence. — Nous avons dit que chaque lampe demande, entre ses extrémités, une différence de potentiel appropriée, laquelle est marquée sur le verre même.

Si nous prenons toutes celles d'un *voltage déterminé* mais de puissances lumineuses différentes, nous voyons qu'elles se distinguent les unes des autres par leur résistance propre ; cela fait qu'elles absorbent des courants d'intensités inégales. Généralement on compte que le pouvoir lumineux d'une bougie décimale coûte une puissance électrique de 3,5 watts en moyenne quand on applique à la lampe le voltage normal. Cette donnée nous permet de calculer aisément l'intensité du courant pris à la canalisation ou encore la résistance du filament. Soit, en effet, une source de 16 bougies, 110 volts. Son alimentation exige

$$3,5 \times 16 = 56 \text{ watts}$$

Sous 110 volts, l'intensité est donc

$$I = \frac{56}{110} \text{ ampère}$$

soit environ un demi-ampère et sa résistance

$$R = \frac{E}{I} \text{ ohms}$$

soit 220 ohms environ dans l'exemple proposé.

Au point de vue de la consommation d'énergie par bougie, on peut dire que les

lampes de bas voltage sont les plus économiques ; certaines, de 5 à 20 volts, fonctionnent en absorbant seulement 2,2 à 2,7 watts par bougie.

Généralement on a intérêt à *pousser les lampes* c'est-à-dire à les alimenter à un voltage supérieur au normal ; de cette manière l'intensité lumineuse augmente notablement pour un accroissement minime de dépense d'énergie électrique. On arrive ainsi à des consommations de 3 watts et de 2,5 watts par bougie décimale.

Ce régime forcé abrège de beaucoup *la vie* de la lampe. En effet, tandis qu'une lampe ordinaire, menée à son voltage normal, a une durée de 1.000 heures environ, avec une consommation *moyenne* de 4 watts par bougie, on voit cette durée tomber à 400 ou même 300 heures si on pousse la lampe suffisamment pour réduire la consommation à 3 ou 2,5 watts. Malgré cela le procédé est économique. En effet, adoptons comme base de notre calcul un prix de :

0^f 55 pour la lampe
0^f 75 pour le kilowatt-heure d'énergie.

Soit une lampe de 16 bougies en service 2.000 heures par an. Le coût annuel de l'éclairage sera :

1er *Régime* à 4 watts par bougie :

a) Energie électrique :	$4 \times 16 \times 2.000 = 128.000$ w-h.			
			128 kwh à 0^f 75....	96^f »
b) Nombre de lampes :	$\frac{2.000}{1.000}$	$= 2$	à 0^f 55....	1 10
			Total....	97^f 10

2e *Régime* à 3 watts par bougie :

a) Energie électrique :	$3 \times 16 \times 2.000 = 96.000$ w-h.			
			96 kwh à 0^f 75....	72^f »
b) Nombre de lampes :	$\frac{2.000}{400}$	$= 5$	à 0^f 55....	2 20
			Total....	74^f 20

On comprend donc l'avantage de forcer les lampes ; l'économie est d'ailleurs plus considérable encore si le prix de l'énergie électrique est supérieur à celui que nous avons supposé.

Nous avons parlé de *consommation moyenne ;* en effet, prenons une lampe ordinaire demandant au début 3,5 watts par bougie. Après un certain temps de service, le filament s'est aminci par suite de la volatilisation partielle du carbone et d'autre part ce charbon s'est déposé à la surface de l'ampoule de sorte que la consommation s'élève peu à peu, atteint 4 watts puis 4,5 watts ; le *nombre moyen* de watts est donc supérieur au chiffre initial.

Qu'entend-on maintenant par *vie de la lampe ?* On n'attend jamais (sauf accident),

pour remplacer la lampe, que le filament se soit rompu; mais on remplace la source par une nouvelle quand l'intensité lumineuse s'est abaissée de 15 à 20 0/0 au-dessous de sa valeur nominale. Si nous prenons une lampe de 16 bougies, au régime initial de 3,5 watts, on trouve que son pouvoir éclairant diminue à peu près de la manière suivante :

Après	200	heures	d'allumage.	15,5	bougies
—	400	—	—	15	—
—	600	—	—	14,5	—
—	700	—	—	14	—
—	800	—	—	13,5	—
—	900	—	—	12,5	—

En même temps que la lampe devient insuffisante comme éclairage, la consommation croît et, après 7 ou 800 heures, il est temps d'opérer le remplacement.

Les lampes à incandescence s'accommodent aussi bien des courants alternatifs que du continu, mais à la condition d'adopter une fréquence suffisante. Ordinairement on ne descend pas au-dessous de $n = 40$.

Lampe Nernst. — Son principe réside dans l'emploi d'un conducteur formé d'oxydes divers et autres combinaisons fixes, isolantes à la température ordinaire mais conductrices électrolytiquement à un degré de chaleur plus élevé. Dans ces conditions, le crayon devient capable de produire des effets calorifiques et lumineux et il présente sur les filaments ordinaires, l'avantage d'être incombustible; il ne nécessite donc pas d'ampoule vide.

D'un autre côté, la substance n'étant pas conductrice à froid arrête le courant et il faut imaginer un procédé spécial pour *l'allumage*. On a fait usage, dans ce but, d'une source calorifique ou encore d'un liquide (solution de SO^4Mg à 2 0/0 avec 1 0/0 d'acide, par exemple), pour faire le passage à l'électricité. Mais ces procédés suppriment l'un des grands avantages de la lampe à incandescence, la commodité de l'allumage.

La consommation d'énergie dans une lampe Nernst est évaluée, au début, à 1 watt par bougie, mais elle augmente un peu avec le temps.

CHAPITRE III

INSTALLATION DE L'ECLAIRAGE ELECTRIQUE

Avantages de la lumière électrique. — Ces avantages sont nombreux :

1° Au point de vue hygiénique : on a évalué à 27 litres le volume de gaz carbonique dégagé en une heure par une lampe de 100 carcels, et la chaleur produite est de 540 calories. Des becs de gaz de même puissance lumineuse donnent un mètre cube de CO^2 et une chaleur de 10.000 calories en moyenne. On voit l'avantage de l'arc sur le gaz. L'emploi des régulateurs ne dispense pas d'ailleurs de ventiler, car il y a dégagement d'une petite quantité d'oxyde de carbone dont il faut se débarrasser.

La lampe à incandescence ne donne évidemment pas de gaz délétère, mais elle produit de la chaleur : 2.700 calories environ pour 100 carcels-heure.

Ainsi l'air n'est pas du tout (incandescence) ou très peu vicié (cas de l'arc) par l'éclairage électrique, alors que les autres systèmes déversent dans l'atmosphère des quantités considérables de gaz obligeant à une ventilation énergique. La production moindre de chaleur est encore un avantage de l'électricité;

2° Économie. Pour une installation importante, on trouve généralement une économie notable à employer l'électricité;

3° La lumière électrique contient toutes les radiations possibles; elle se rapproche dès lors de celle du jour, de sorte que les couleurs des objets se trouvent respectées. Cette propriété est précieuse dans certaines industries : teinture, impression, etc. et dans certains commerces où l'on a besoin de bien distinguer à toute heure de la journée les diverses teintes;

4° Les foyers électriques n'émettent pas de gaz sulfureux ou autres capables d'agir sur les peintures, les tentures et les étoffes;

5° Avec une canalisation bien faite, les chances d'incendie sont absolument écartées. Dans les locaux dangereux contenant des corps inflammables ou explosifs, les seules lumières acceptables sont les lampes à incandescence entourées d'un double globe;

6° On ne saurait recourir pratiquement à d'autres moyens que les foyers électriques quand on veut des sources très intenses. On les emploie pour l'éclairage des grands

espaces, des projecteurs, des phares, etc.. et on atteint ainsi des intensités lumineuses de plusieurs millions de carcels : le phare du cap de la Hève donne 2.500.000 carcels; celui du port de New-York en fournit 12.500.000.

Choix et nombre des sources. — Il n'est pas possible de donner des indications générales précises au sujet du choix des sources et du nombre des foyers. On peut cependant, dans un avant-projet, adopter les chiffres moyens qui suivent :

1° Pour l'extérieur, on prend de préférence les arcs; on adopte souvent des lampes de 10 à 12 ampères. S'il s'agit de chercher le nombre et la distribution de ces sources, il convient de se rappeler que l'on doit placer les lampes à la plus grande hauteur possible pour éviter le contraste qui s'établit forcément entre les points lumineux et les objets les moins éclairés. Cette disposition a du reste le second avantage d'empêcher le jeu de l'iris de l'œil humain. Sous l'action directe d'une lumière trop vive le diamètre de la pupille se rétrécit, et l'impression de la rétine est réduite en proportion. L'emploi des globes translucides autour des arcs a d'ailleurs pour but d'affaiblir l'éclat de la source. Il conduit à une perte de lumière que l'on estime atteindre 20 à 30 %, mais qui se trouve compensée si l'on empêche l'œil de se diaphragmer.

Au lieu de faire usage des globes diffuseurs pour masquer l'arc à la vue, on adopte quelquefois actuellement des réflecteurs qui produisent le même effet.

Quant au nombre de sources et à leur hauteur, ils dépendent de la nature de l'éclairage à obtenir. Pour des places, rues, squares, etc., un éclairage de 2 à 4 bougies-mètre [1] est très brillant (entre ces deux limites, sont en effet compris les éclairements des voies les plus favorisées de Paris à ce point de vue).

Supposons des arcs de 12 ampères; si on les élève à 10 mètres, on doit espacer chaque candélabre de 40 mètres environ pour obtenir une répartition convenable de la lumière.

Il est bien évident que si l'on désire plus de clarté, il faut rapprocher les sources et en même temps on diminue souvent la hauteur des pylônes. Cela est notamment nécessaire dans les grands chantiers, gares, etc.

Pour les éclairages intérieurs, le choix et la répartition des foyers lumineux dépendent de bien des circonstances. Si les salles sont de grande hauteur comme les halles de montage, par exemple, le choix de l'arc est tout indiqué. Souvent on compte, dans ce cas, la surface à éclairer en mètres carrés et l'on donne aux sources une intensité totale d'environ $\frac{1}{2}$ carcel par mètre. Dans les ateliers d'arts mécaniques : ajustages, tours, etc., on doit compter sur au moins 1,5 carcel par mètre superficiel; dans les filatures, tissages, imprimeries, il faut davantage et le nombre exact doit être étudié pour chaque cas spécial, selon la nature du travail. Parmi les diverses façons de procéder à cet éclairage, on peut adopter celle des plafonds lumineux : l'arc présente son

1. On sait qu'une bougie-mètre est l'éclairement produit par une bougie décimale à un mètre de distance.



charbon positif à la partie inférieure et rayonne par conséquent la lumière vers le haut; un réflecteur contribue d'ailleurs à donner cette direction au faisceau. La lumière est reçue sur le plafond et sur les murs que l'on doit tenir bien blancs; ce sont alors ces surfaces éclairées qui servent à la diffusion. Le système est encore adopté pour l'éclairage des salles de travail, bureaux de dessin, etc.

Dans le cas où les ateliers comprennent des machines-outils ou des métiers portant ombre, on ne pourrait employer l'arc; on s'adresse aux lampes à incandescence que l'on dispose aux endroits mêmes qui doivent être éclairés. Alors il n'y a pas de règle pour le nombre des sources; c'est à l'expérience d'indiquer si les lumières employées conviennent au travail.

Quand il s'agit de l'éclairage des appartements, on prend le plus souvent les lampes à incandescence et le nombre de bougies est réglé soit par le cube des salles, soit par la surface du plancher. On compte de 1 à 2 bougies pour un éclairage moyen et 3, 4 et même 5 par mètre carré, si l'on veut un éclairage brillant.

Quand on se rapporte au volume des appartements, on admet une demi-bougie à une bougie et demie par mètre cube.

Section des conducteurs. — Comme on l'a dit au sujet de la distribution, cette section dépend de plusieurs facteurs. Nous verrons plus loin comment on la calcule en fonction de la perte d'énergie; mais nous pouvons donner dès maintenant les intensités maxima que l'on tolère dans les fils isolés placés sous moulures en bois :

3 ampères	par millimètre	carré	pour des sections	de 1 à	5 $^{m}/_{m^2}$
2,5 —	—	—	—	de 5 à	10 —
2 —	—	—	—	de 10 à	100 —
1,5 —	—	—	—	supérieures à	100 —

Les fils nus peuvent supporter un courant égal au double des précédents.

Enfin, dans aucun cas, il ne faut prendre de fil de diamètre inférieur à 9/10 de millimètre.

En général, dans un avant-projet, on compte sur une perte maxima représentant le dixième de l'énergie totale.

Divers cas de montage. — Les systèmes peuvent être extrêmement variés. Nous avons vu qu'on emploie, suivant les circonstances, des arcs, soit avec régulateurs, soit avec bougies, ou encore des lampes à incandescence. Ces appareils sont alimentés de courants continus et de courants alternatifs.

Nous aurons à joindre à l'étude du montage des arcs et des lampes incandescentes, l'examen des installations mixtes qui comprennent les deux genres de foyers.

I. Montage des régulateurs. — On les installe de trois manières différentes, comme nous l'avons dit, dans l'étude de la distribution en général :



1° En tension;

2° En quantité;

3° En séries multiples.

1° *Groupement en tension* : La disposition est très simple comme l'indique le schéma (fig. 582); toutes les lampes se mettent bout à bout et la tension entre les extrémités du circuit égale la somme des forces électromotrices demandées par les divers arcs (si on ne tient pas compte de la perte de voltage dans le fil).

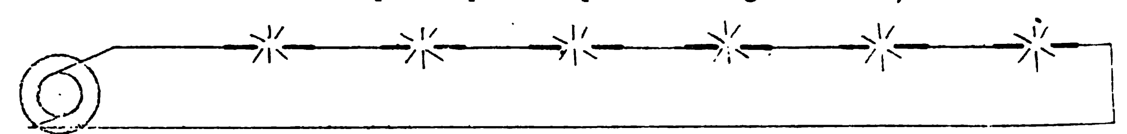


Fig. 582.

L'intensité du courant est la même quel que soit le nombre de foyers; elle est donc peu considérable, ce qui permet de faire usage de fils conducteurs de section réduite et de transporter l'électricité d'une manière économique. De plus, les résistances additionnelles deviennent ici inutiles, les diverses lampes jouant ce rôle les unes par rapport aux autres.

Pour éviter l'extinction de tout le système en cas d'accident arrivé à l'une d'elles, on doit munir chacune d'un système automatique capable de remplacer la lampe éteinte par une résistance convenable.

Ce mode de montage exige un courant d'intensité invariable quel que soit le nombre des lampes en service; il faut donc, pour alimenter le circuit, une machine *à intensité constante*, c'est-à-dire de construction spéciale.

On sait qu'un arc exige environ 50 volts entre ses bornes; or la tension maxima pratique atteinte dans l'emploi des courants continus peut être fixée à 3.000 volts; la limite du nombre d'arcs alimentés en série par ces courants est donc :

$$\frac{3.000}{50} = 60.$$

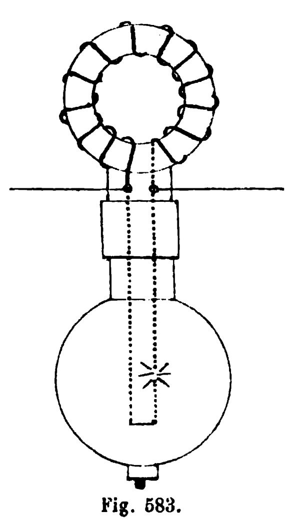


Fig. 583.

On dépasse très notablement ce nombre par l'usage des courants alternatifs qui permettent d'atteindre des tensions considérables. Parmi les systèmes pratiques proposés, citons celui de M. Harry décrit dans le journal l'*Electricien* (1). En dérivation sur chaque lampe est placée une bobine de self ayant la forme annulaire et constituée par une armature en feuilles de tôle bien douce exempte le plus possible d'hystérésis. Un fil conducteur assez gros pour supporter tout le courant principal est enroulé sur ce noyau (fig. 583). En temps ordinaire, le courant passe de préférence dans l'arc à cause de la grande réactance de la bobine. Le courant dé-

(1) *L'Électricien*, tome XI, page 321.

rivé est d'ailleurs déwatté, par suite de la grandeur du coefficient de self-induction et du retard de phase qui en résulte.

Ce courant est suffisant pour produire la saturation magnétique de l'armature et on arrive à maintenir, entre les bornes de la lampe, une *tension invariable*, indépendante de la marche de la source. Il en résulte la possibilité d'alimenter toute la série par une machine à *potentiel constant*. Le rôle de ces bobines de réactance est si actif qu'on a pu, dans une expérience, enlever les charbons au tiers des lampes sans affecter la marche des autres;

2° *Groupement en quantité.* — On peut, comme nous le savons, disposer chaque régulateur sur un branchement pris entre les deux distributeurs AB et CD, ce qui économise le fil (fig. 584), ou encore donner à chaque régulateur un circuit séparé,

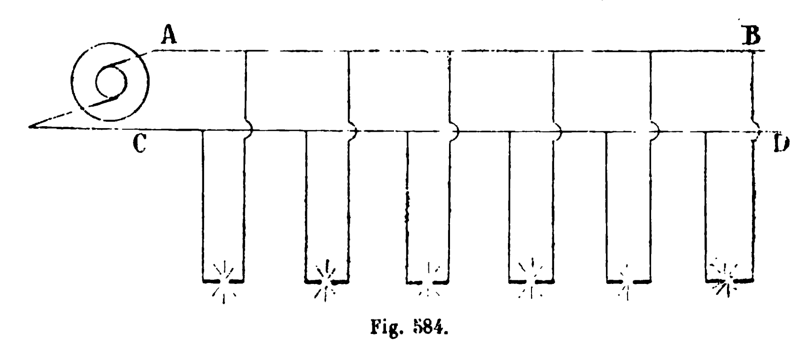


Fig. 584.

dans le but d'agir sur les lampes, pour l'allumage ou l'extinction, d'un même point, du tableau de distribution par exemple. Mais alors il n'est ordinairement pas nécessaire de disposer autant de lignes complètes distinctes qu'il y a d'arcs : de la barre — du tableau part un fil *unique* sur lequel sont branchées toutes les lampes tandis qu'à la barre positive sont connectés tous les conducteurs individuels des arcs. Chacun est muni d'un interrupteur et d'un rhéostat de réglage (de 2 à 4 ohms environ); il est protégé par un coupe-circuit à fil fusible.

Si nous ne tenons pas compte de la perte de tension sur la ligne, nous voyons que le voltage demandé à la dynamo est celui d'une seule lampe. Quant à l'intensité, c'est la somme de celles exigées par les diverses sources séparées.

Rappelons que le système est désavantageux au point de vue économique, en raison même de cette grande intensité du courant nécessaire.

3° *Groupement en séries multiples.* — Sur chaque branchement ou sur chaque

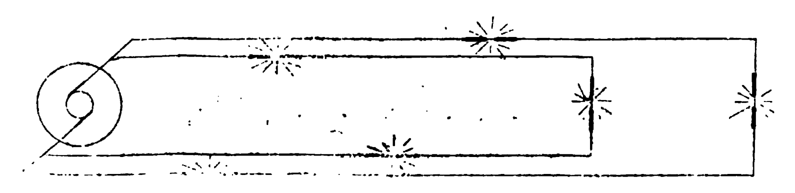


Fig. 585.

circuit séparé, on place un même nombre de lampes. Le schéma (fig. 585) montre trois



régulateurs par branche. Si V est le voltage exigé par une lampe, nous devons demander 3 V à la machine. L'intensité est I dans chaque circuit; sa valeur totale est donc, pour n lampes :

$$\frac{n}{3} \times I$$

Souvent on fait des boucles de deux régulateurs, ce qui permet d'utiliser l'électricité sous le voltage 110, qui est celui de beaucoup de stations centrales et d'installations isolées. Les résistances additionnelles servent alors aux deux lampes du même circuit. Comme nous l'avons dit déjà, on est arrivé à disposer trois lampes sur 110 volts et on supprime alors le rhéostat.

Ce système de disposition mixte des arcs peut sembler, à première vue, préférable à tout autre, car il permet de distribuer l'électricité sous une tension assez forte si on multiplie le nombre de lampes en série. En réalité ce nombre est limité, car si l'on veut employer plusieurs circuits pris sur la même machine, il se produit forcément, dans les uns, des variations de potentiel qui n'ont pas lieu dans les autres et la marche de la lumière est irrégulière.

On peut facilement mettre six lampes sur 220 volts ou, au maximum, 12 sur 450, mais on doit munir chaque régulateur d'un veilleur automatique destiné au remplacement par une résistance équivalente de la lampe qui viendrait à s'éteindre.

Si l'on fait usage des courants alternatifs, la même limite n'existe pas et l'on peut faire des séries bien plus importantes en employant, par exemple, le système des bobines à réactance (voir p. 564). Alors tous les circuits absorbent une même force électromotrice efficace et l'on peut grouper autant de circuits semblables que l'on veut : les unités génératrices deviennent considérables et l'on y gagne au point de vue du rendement.

Exemple d'installation d'arcs électriques. — Supposons que l'on veuille disposer dix régulateurs de dix ampères absolument indépendants les uns des autres et distants de la dynamo :

Deux de.	25 mètres
Quatre de	50 —
Quatre de	75 —

Comptons sur une différence de potentiel de 50 volts entre les bornes de chaque régulateur. Nous emploierons des circuits tout à fait distincts et nous demanderons, suivant la moyenne admise, en plus des 50 volts nécessaires, un supplément de 10 % à la machine. C'est donc 55 volts environ que la dynamo devra développer. Le débit total est de

$$10 \times 10 = 100 \text{ ampères}$$

et la puissance électrique à fournir

$$100 \times 55 = 5.500 \text{ watts,}$$

ce qui fait près de 8 chevaux-vapeur,



Pour ne pas nous trouver trop près de la limite, nous devrons nous munir d'un moteur mécanique d'au moins 10 chevaux.

Nous allons maintenant calculer la section à donner aux divers conducteurs destinés aux lampes. Chacun doit absorber les cinq volts disponibles; cette donnée permet de calculer la section du fil; nous avons en effet deux conducteurs de 50 mètres aller et retour, quatre de 100 et quatre de 150 mètres. Chacun est parcouru par le même courant de 10 ampères; ils devront donc présenter tous à l'électricité une même résistance, soit de

$$\frac{5}{10} = 0,5 \text{ ohm.}$$

Les conducteurs de 50 mètres auront donc par mètre une résistance de

$$\frac{0,5}{50} = 0,01 \text{ ohm.}$$

Or le tableau de la page 73 nous conduit à une section correspondante (fil de cuivre) de

$$1^{mm^2},57$$

soit un diamètre de 14/10 de millimètre.

Pratiquement ce fil est faible pour un courant de 10 ampères; il y a intérêt à l'augmenter, on prendra du 20/10 et la résistance additionnelle aura alors à absorber l'excès de voltage.

Les conducteurs de 100 mètres ont par mètre linéaire la résistance

$$\frac{0,5}{100} = 0,005$$

d'où une section de

$$3^{mm^2},15$$

c'est-à-dire un diamètre de 20/10 également.

Enfin les fils de 150 mètres nous donnent de même

$$\frac{0,5}{150} = 0,0033$$

Ils auront une section de

$$4^{mm^2},72$$

soit un diamètre de 25/10.

II. — Montage des lampes à incandescence. — Ces lampes ont une résistance considérable ce qui fait qu'on ne les alimente presque jamais en série. Cependant on construit, comme on l'a indiqué, des lampes fonctionnant sous une



tension réduite, que l'on peut disposer sur un même circuit ou sur plusieurs circuits en parallèle.

Le plus ordinairement on fait usage des lampes de construction courante de 55 à 220 volts et on les alimente en dérivation ; on établit deux distributeurs AB et CD entre lesquels se branchent les lumières (fig. 586) ; on peut d'ailleurs, comme nous le savons,

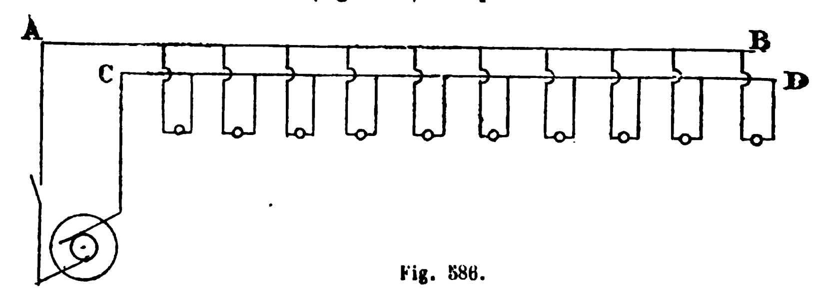
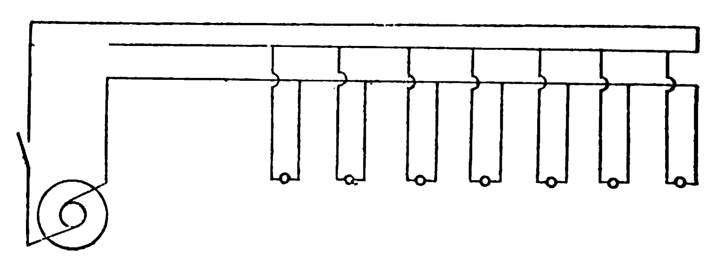


Fig. 586.

employer la disposition en boucle (fig. 587) dans le but d'égaliser les pertes de tension.


Fig. 587.

Enfin, pour des raisons diverses, il est quelquefois avantageux de diviser les lampes en plusieurs circuits distincts. Cela permet de n'allumer, en même temps, qu'une partie des sources lumineuses (fig. 588).

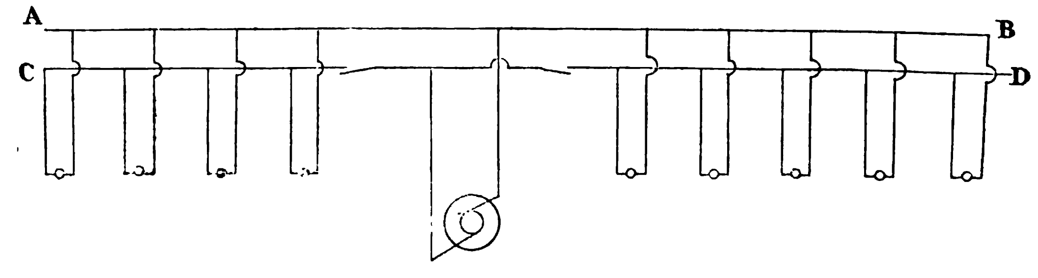


Fig. 588.

Dans ces divers cas, le voltage nécessité est toujours celui d'une seule lampe sauf les pertes sur la ligne. L'intensité est la somme de celles exigées par toutes les sources. La grande valeur de cette intensité est le gros reproche inévitable que l'on fait à ce genre d'éclairage. On l'atténue un peu en employant des lampes d'assez fort voltage soit ordinairement 110. Mais si l'on veut encore diminuer ce débit, dans une installation importante, on a la ressource de faire usage des systèmes à conducteurs multiples, trois et cinq fils (voir la Distribution).

Exemple d'installation des lampes à incandescence. — On veut partager 100 lampes de 16 bougies en deux circuits égaux et distincts présentant l'un une longueur totale de 250 mètres l'autre une longueur de 200. Nous choisirons des lampes de 110 volts; la consommation ordinaire est de 3,5 watts par bougie. Chacune demande donc

$$16 \times 3,5 = 56 \text{ watts}$$

et, puisque la tension est de 110 volts, il faudra une intensité de

$$\frac{56}{110} = 0,5 \text{ ampère.}$$

Dès lors chaque circuit exige

$$50 \times 0,05 = 25 \text{ ampères}$$

et la dynamo doit en fournir 50 pour les deux groupes réunis.

Le voltage à la machine sera de 110, plus la perte de 10 0/0, soit 12 volts environ, ensemble 122 volts.

La puissance exigée est alors de

$$122 \times 50 = 6.100 \text{ watts}$$

ou théoriquement

$$\frac{6.100}{736} = 8,4 \text{ chevaux-vapeur}$$

Un moteur de 10 chevaux au minimum est nécessaire. Calculons maintenant la section des distributeurs; l'intensité y est de 25 ampères et la perte de tension atteint 12 volts; on a donc

$$R = \frac{12}{25} = 0,48 \text{ ohm}$$

Cette résistance donne par mètre, dans le circuit de 200 mètres

$$\frac{0,48}{200} = 0,0024 \text{ ohm}$$

et dans l'autre

$$\frac{0,48}{250} = 0,00192 \text{ ohm.}$$

L'emploi de la table déjà consultée nous montre que les sections sont respectivement

$$6^{mm^2},63$$
$$8^{mm^2},3$$

et les diamètres 30/10 et 32/10.

Quant aux branchements individuels, on les fera en fils de 9/10. Généralement les groupes de lampes destinées à une même salle sont protégés par un plomb fusible.



III. — Montage de bougies. — Elles sont nécessairement alimentées de courants alternatifs. Ces courants se transportent sous de fortes tensions et l'on peut mettre tous les appareils en série. Le mode de distribution est économique mais il faut des veilleurs automatiques. Quelquefois la distribution se fait en dérivation. Alors on peut, par raison d'économie dans l'installation, adjoindre à chaque appareil un transformateur qui abaisse le potentiel à la valeur convenable ; ce transformateur est monté sur le même support que la lampe elle-même.

Dans certains cas les bougies se disposent en plusieurs séries parallèles ; un transformateur par circuit suffit alors.

IV. — Montage mixte d'arcs et de lampes à incandescence. — Ce cas se présente souvent : on met d'une part toutes les lampes en quantité comme cela se fait ordinairement puis, d'autre part, on dispose les arcs sur un ou plusieurs circuits indépendants de ceux des lampes.

Dans ces genres de montage, on doit s'attacher à assurer aux deux sortes de sources le potentiel convenable, et, pour cela, on met sur le circuit qui demande la moindre tension, des résistances suffisantes pour absorber le voltage en excès.

Un mode particulier souvent adopté consiste à faire usage de lampes à 110 volts que l'on alimente toutes en dérivation au moyen d'une tension de 122 volts environ. Les

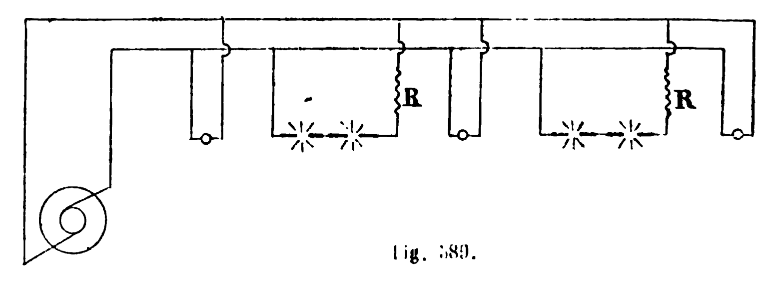


Fig. 589.

arcs sont placés par deux ou par trois en série ; ils peuvent être branchés sur les mêmes distributeurs que les lampes incandescentes (fig. 589) ou bien posséder leurs distri-

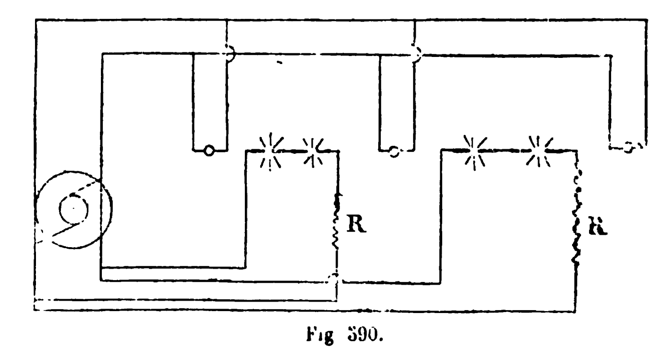


Fig. 590.

buteurs spéciaux. On peut encore faire un circuit complètement séparé pour deux arcs (fig. 590). Chaque paire est alors allumée ou éteinte du tableau même. Si les arcs sont

par deux, il faut mettre sur chaque branche de régulateurs une résistance additionnelle telle que R. Le tableau de distribution porte ces résistances; il comprend alors un interrupteur et quelquefois un indicateur de courant, ou un petit ampèremètre, pour chaque circuit séparé.

Exemple de montage mixte. — Soit à placer 100 lampes de 16 bougies et 20 régulateurs de 8 ampères par deux en série.

On supposera un circuit spécial pour l'incandescence et un autre pour les régulateurs.

Les premières lampes, à raison de 0,50 ampère par source, sous 110 volts demandent

$$0,5 \times 100 = 50 \text{ ampères.}$$

Les arcs exigent puisqu'ils forment 10 groupements

$$10 \times 8 = 80 \text{ ampères.}$$

Le débit total est de

$$50 + 80 = 130 \text{ ampères.}$$

Nous avons besoin du voltage 122; de sorte que l'énergie nécessaire s'évalue par

$$122 \times 130 = 15.860 \text{ watts}$$

soit environ 21 chevaux. La machine sera de 25 au minimum.

Calculons la section des distributeurs en supposant à chaque circuit une longueur totale de 200 mètres, aller et retour,

1° *Lampes*: chute de tension 12 volts; intensité 50 ampères; la résistance doit être

$$\frac{12}{50} = 0,24 \text{ ohm}$$

sa valeur par mètre s'exprime par

$$\frac{0,24}{200} = 0,0012$$

Elle équivaut à une section de 13$^{mm^2}$,2, soit à un diamètre de 42/10.

2° *Arcs*: Comptons sur une chute de potentiel de 100 volts dans les deux arcs et dans leur résistance additionnelle; il nous reste 22 volts à perdre dans la ligne, l'intensité étant de 80 ampères. Cette perte correspond à une résistance

$$R = \frac{22}{80} = 0,275 \text{ ohm}$$

et, par mètre, à

$$\frac{0,275}{200} = 0,001375$$



La section du fil est alors de $11^{mm^2},6$.

Évidemment un tel conducteur est insuffisant pour le passage d'un courant de 80 ampères; nous devons prendre un câble de 40 millimètres carrés environ dont la résistance n'est que de 0,078 ohm; ce conducteur provoque une chute de potentiel de 6,3 volts seulement, et il faut augmenter la résistance additionnelle de la quantité complémentaire; il y aurait intérêt, dans ce cas, à disposer les arcs par trois et à réduire le rhéostat.

Emploi des courants polyphasés pour l'éclairage. — Nous savons que les courants alternatifs s'emploient dans l'éclairage aussi bien que les continus. Les courants à plusieurs phases peuvent également servir. S'il s'agit de courants diphasés, nous avons deux circuits distincts sur lesquels nous pouvons placer les lampes à la façon ordinaire. Mais les triphasés se présentent différemment : on a trois branches et il s'agit de les charger également. Il y a deux manières d'opérer :

1° La disposition *en triangle* consiste à former les trois branches AB, BC, CA et à disposer sur chacune une ou un même nombre de lampes. On relie les trois sommets aux trois fils de la ligne (fig. 591);

2° Le montage *en étoile* revient à disposer autour d'un point O trois conducteurs OA, OB, OC également chargés et à relier chaque extrémité A, B, C aux fils de la ligne par les trois conducteurs 1, 2, 3 (fig. 592).

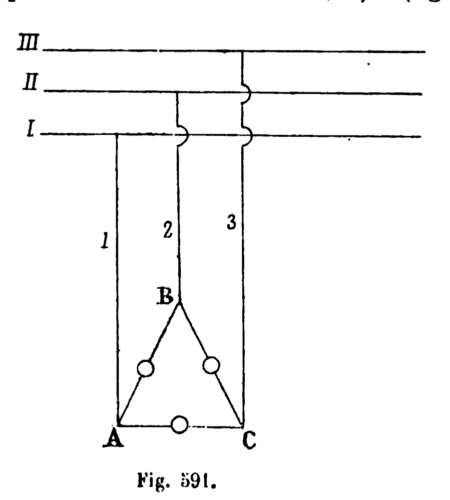


Fig. 591.

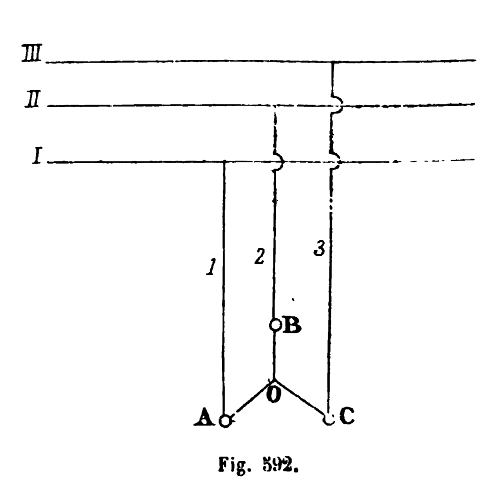


Fig. 592.

Applications diverses de l'éclairage électrique. — Dans tous les cas où l'intensité lumineuse demandée est considérable, on emploie l'électricité : dans les phares, pour l'alimentation des projecteurs militaires, dans le traitement de certaines affections (photothérapie), etc.

L'électricité a également sa place marquée dans l'éclairage des ateliers, grands espaces, cours, gares. Dans ces cas, c'est presque toujours l'arc que l'on emploie.

Beaucoup de théâtres ont adopté l'électricité pour leur éclairage ; la sécurité est bien

plus grande qu'avec le gaz ; les dégagements gazeux sont évités et la chaleur diminuée dans une proportion notable. On est allé même jusqu'à éclairer des musées (*British Museum* de Londres).

Quant aux appartements, magasins, etc., leur éclairage par l'électricité se fait souvent quand il existe une station centrale : on emploie les lampes à incandescence dont on varie très facilement les effets au moyen de globes et de tulipes colorés.

Parmi tous les emplois de l'électricité pour l'éclairage, il y a deux cas surtout intéressants à examiner : l'éclairage des mines et celui des voitures de chemin de fer.

Dans les mines, on pourrait bien éclairer toute la galerie au moyen de conducteurs reliés à des lampes fixes, mais on préfère laisser à chaque mineur une source séparée. On tend maintenant à employer des petites lampes à incandescence alimentées soit par des piles portatives, soit plutôt par des accumulateurs enfermés dans une boîte qui fait corps avec la source. Ces accumulateurs peuvent fournir le courant pendant plusieurs heures et on les recharge périodiquement.

L'éclairage des voitures de chemin de fer peut se faire de différentes façons :

1° Par dynamos entraînées soit par un moteur spécial, soit par les essieux mêmes du train ;

2° Par accumulateurs.

Jusqu'ici, c'est toujours la deuxième méthode qui est employée : chaque wagon possède ses accumulateurs séparés ; ils sont ordinairement chargés dans les gares têtes de ligne après transbordement, et ils alimentent des lampes à bas voltage dont les filaments, plus courts, résistent mieux que les autres aux trépidations du train. Plusieurs compagnies suisses ont adopté ce système ; la Compagnie du Nord, en France, l'utilise depuis longtemps ; les lampes sont respectivement de 10, 8 et 6 bougies dans les compartiments de 1re, de 2e et de 3e classes ; on estime à 20 % environ l'économie réalisée sur l'ancien éclairage.

Prix de l'éclairage par l'électricité. — Cette question, très importante au point de vue pratique, ne peut être traitée dans toute sa généralité. Le prix dépend de la façon de produire l'électricité ; il varie aussi avec le mode d'utilisation : lampes à arc ou à incandescence. Ainsi, tandis qu'une lampe à filament demande de 1,5 à 4 watts par bougie, un arc ne consomme pour la même intensité lumineuse qu'un demi-watt environ.

Quand l'énergie est prise à une distribution de ville, il faut compter sur un prix de 0 fr. 50 à 1 franc le kilowatt-heure. Ce chiffre correspond, pour une bougie pendant une heure, à une dépense variant de 0 fr. 00025 à 0 fr. 0005 si la lumière est due à l'arc, et de 0 fr. 0017 à 0 fr. 0035 si on se sert de lampes à incandescence à 3,5 watts par bougie (une lampe de 16 bougies coûte par heure de 2,7 à 5,4 centimes).

D'après ces chiffres, l'avantage économique appartient, à pouvoir lumineux égal, à l'arc électrique ; parmi les autres sources, viendraient ensuite les becs Auer, puis le pétrole, le gaz, l'incandescence électrique.

Quand l'installation est assez importante pour comporter une usine spéciale, les prix de revient varient; ils peuvent être abaissés à 15 ou 20 centimes.

Dans ce prix, d'ailleurs très variable, il faut bien distinguer les frais d'installation de ceux d'exploitation. Les premiers prennent une valeur assez considérable pour l'éclairage électrique, mais l'exploitation est bien moins onéreuse que celle de tout autre système.

ONZIÈME PARTIE

TRANSPORT DE L'ÉNERGIE PAR L'ELECTRICITE

CHAPITRE PREMIER

MOTEURS A COURANT CONTINU

Réversibilité des dynamos. — Nous avons eu déjà l'occasion de faire allusion à cette propriété : *une machine dynamo ou magnéto tourne si on l'alimente d'un courant continu.*

Nous ne nous arrêterons pas, pour le moment, au sens de cette rotation; il nous suffit de savoir que la machine se meut et qu'elle peut entraîner avec elle des organes divers.

Ainsi une dynamo, mise en mouvement par un effort extérieur, produit de l'électricité; la même machine recevant un courant est capable de donner du travail : elle est donc *réversible.*

On pourrait dès lors songer à *produire* l'énergie mécanique par ce moyen; mais il n'est possible de se procurer l'énergie, sous forme électrique et d'une façon avantageuse, qu'aux dépens de la puissance mécanique — moteurs divers, chutes d'eau, etc. (nous ne devons pas penser aux moyens chimiques — piles — ou aux procédés calorifiques — piles thermo-électriques — dans l'état actuel de nos connaissances). Il en résulte une impossibilité pratique d'*engendrer* économiquement du travail par l'électricité; le seul rôle de la réversibilité — et il est immense — est celui d'intermédiaire dans la *transmission* et la *distribution* de l'énergie; en effet, une première

dynamo mue par un moteur, engendre de l'électricité; des fils conducteurs issus de là aboutissent à une ou plusieurs autres dynamos situées aux lieux d'utilisation du travail, et ces machines tournent en vertu de la réversibilité.

La première dynamo se nomme *génératrice*; les autres *réceptrices, moteurs électriques* ou *électromoteurs.*

Le transport du travail par l'électricité est une suite de transformations de l'énergie; supposons en effet une génératrice mue par un moteur à vapeur; nous pouvons suivre les phases suivantes :

1° Le charbon qui sert de combustible possède en soi de l'énergie sous la forme chimique; brûlant dans le foyer, il change la nature de son énergie qui devient calorifique;

2° La machine alimentée par la vapeur chaude repose sur la transformation de la chaleur en travail;

3° Dans la génératrice, nous voyons passer l'énergie de la forme mécanique à l'état électrique, et c'est ainsi que l'énergie est transportée;

4° Au poste d'arrivée, une modification inverse de la précédente se produit.

En résumé, nous avons les transformations suivantes :

Chaudière :	Énergie	chimique (charbon)	changée en	énergie	calorifique (vapeur).
Machine à vapeur :	—	calorifique (vapeur)	—	—	mécanique.
Génératrice :	—	mécanique	—	—	électrique.
Réceptrice :	—	électrique	—	—	mécanique.

Finalement, nous recueillons du travail mécanique pour une dépense initiale d'énergie chimique. Les trois formes calorifique, mécanique et électrique, que nous rencontrons, sont des intermédiaires. La dernière est indispensable, étant donnée la facilité avec laquelle elle se transporte; mais les deux autres, chaleur et travail, devraient pouvoir être évitées. On rendrait ainsi inutiles la chaudière et le moteur, et l'appareil du premier poste serait une véritable pile produisant directement l'électricité au moyen du charbon. Jusqu'ici ce procédé n'est pas pratique et la méthode indiquée, toute compliquée qu'elle est, reste seule possible.

Le transport de l'énergie par l'électricité n'est pas une opération récente : les télégraphes la réalisent depuis très longtemps. Il en est de même des petits moteurs tournant par les courants et pouvant être actionnés à grande distance. Quelques-uns de ces appareils de démonstration datent de plus de soixante ans, mais ils ne peuvent produire que des effets mécaniques très faibles.

Les seuls moteurs électriques pratiques sont les dynamos employées comme réceptrices, et la première utilisation réellement industrielle a été faite par M. H. Fontaine à l'Exposition de Vienne (Autriche) en 1873 : un moteur à gaz Lenoir actionnait une première dynamo; une autre machine, reliée par fils à la première et placée à un kilomètre de distance, servait de réceptrice et entraînait avec elle une pompe centrifuge.

Cause de la rotation du moteur. — Considérons une dynamo bipolaire à courant continu; nous supposerons les inducteurs excités d'une façon quelconque, les pôles étant en N et en S (fig. 593). Le courant apporté par les balais se divise par moitié dans les deux portions du fil, à droite et à gauche de la ligne neutre, dans les sens indiqués; et une spire quelconque doit se déplacer dans le champ de manière à satisfaire aux lois générales de l'électro-magnétisme. Il est facile, en appliquant la loi de

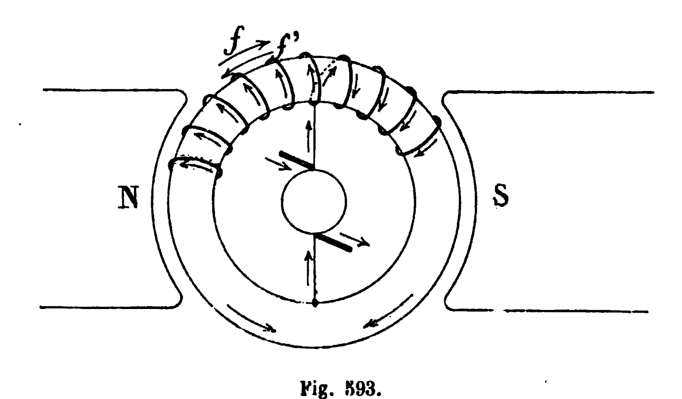


Fig. 593.

Lenz, de trouver le sens de cette rotation. Supposons, pour un instant, le *moteur* servant de *génératrice*; si nous voulons obtenir le courant indiqué, nous devons tourner l'anneau dans le sens de la flèche *f*; or l'électricité produite s'oppose à la continuation du mouvement. Donc cette machine, alimentée par ce même courant et libre de tourner, doit évidemment marcher en sens contraire du mouvement *f*, c'est-à-dire suivant *f'*.

Force contre-électromotrice d'un moteur. — Quand une réceptrice tourne, son fil ne se comporte pas comme un simple conducteur, et il est facile de le démontrer par l'expérience : on fait passer le courant de quelques éléments d'accumulateurs dans le fil d'une dynamo dont l'*arbre est calé*; un ampèremètre, placé sur le circuit, marque une forte intensité de courant I, quotient de la tension E par la résistance des conducteurs, ceux de la machine compris, soit R

$$I = \frac{E}{R} \qquad (1)$$

La même dynamo, abandonnée à elle-même, se met en marche, et alors l'intensité devient i ($i < I$) et si nous supposons la loi d'Ohm toujours applicable, nous pouvons écrire

$$i = \frac{E - e}{R} \qquad (2)$$

Tout se passe donc comme si le moteur en mouvement *opposait* une force électromotrice à celle du courant. Cette tension inverse s'appelle *force contre-électromotrice*

de la réceptrice. Elle peut d'ailleurs se calculer aisément et pour cela, il nous suffit d'appliquer la loi de la conservation de l'énergie.

Le flux $\mathfrak{N}$ des inducteurs se partage entre les deux moitiés de l'anneau par parties égales, $\frac{\mathfrak{N}}{2}$ dans chacune. Soit une spire de l'anneau : dans la position 1 (fig. 594), le flux qui la traverse est nul. Supposons-la déplacée jusqu'en 2; le flux atteint son maximum de valeur $\frac{\mathfrak{N}}{2}$ et le travail absorbé entre les deux positions est (v. p. 163) le produit de l'intensité du courant par la variation de flux. L'intensité est $\frac{i}{2}$ puisque le courant subit une bifurcation comparable à celle du flux de force. On a donc pour travail absorbé par le déplacement d'*une* spire de 1 à 2.

$$\frac{\mathfrak{N}}{2} \times \frac{i}{2}$$

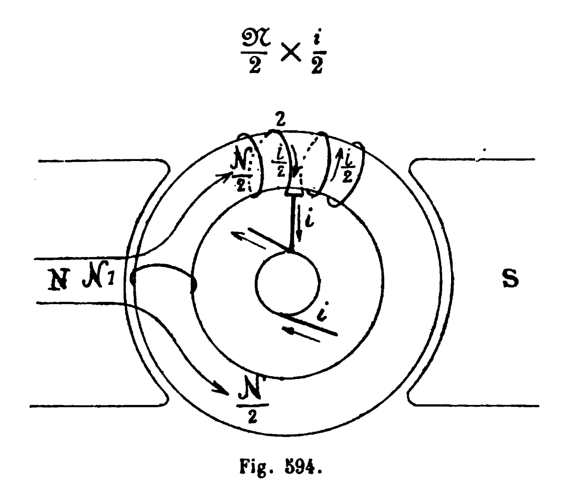


Fig. 594.

Cela correspond à un quart de révolution; pour un tour complet, nous demandons au courant une énergie quatre fois plus grande, soit

$$\mathfrak{N} \times i$$

et si la machine fait N tours par seconde, il nous faut, toujours pour une spire et par seconde

$$\mathrm{N} \times \mathfrak{N} \times i$$

Chaque spire de l'induit en exige d'ailleurs autant, et pour les n tours de l'anneau le travail consommé par seconde s'exprime par

$$\mathrm{N} \times \mathfrak{N} \times n \times i$$

Dès lors soit E la tension sous laquelle l'électricité est distribuée. Avec le débit i, la puissance disponible est

$$\mathrm{E} \times i.$$

Cette énergie se consomme de deux manières :

1° Une partie alimente la réceptrice, soit $\mathfrak{N}$ N n i;

2° L'autre se dégage en chaleur dans les conducteurs de résistance R, soit Ri^2.

On a donc, en écrivant l'égalité de l'énergie produite et de l'énergie dépensée

$$E \times i = \mathfrak{N}\, n\, N\, i + R\, i^2$$

d'où l'on tire, en divisant les deux membres par i, quantité différente de zéro

$$E = \mathfrak{N}\, n\, N + R\, i$$

et

$$(3) \qquad i = \frac{E - \mathfrak{N}\, n\, N}{R}$$

Identifions les deux expressions (2) et (3); nous en tirons la valeur de la *force contre-électromotrice* c'est-à-dire la valeur qu'il faut déduire de la tension donnée pour calculer l'intensité du courant reçu par le moteur.

$$e = \mathfrak{N}\, N\, n$$

On reconnaît là l'expression de la *f. é. m.* de la machine employée comme *génératrice.*

Couple moteur. — La puissance consommée par le moteur est : $\mathfrak{N}$ N n i. Sur l'arbre, on recueille, sauf les pertes, que nous négligerons, un travail égal pendant chaque seconde. Appelons C le couple moteur [1]; le travail utilisable est, par tour, le produit de la force C par le chemin parcouru 2π, soit

$$2\, \pi\, C$$

et par seconde, pour N tours

$$2\, \pi\, N\, C$$

Écrivons donc l'égalité de la puissance consommée et de la puissance utile

$$2\, \pi\, N\, C = \mathfrak{N}\, N\, n\, i$$

Nous en tirons

$$C = \frac{\mathfrak{N}\, n\, i}{2\, \pi}$$

Cette expression nous sera utile dans l'étude de la marche des divers moteurs.

1. Ce couple s'évalue, comme on le sait, par la force agissant normalement à l'extrémité d'un bras de levier unité.

Rendements d'un moteur. — Nous venons de voir que, même théoriquement, toute l'énergie reçue par le moteur n'est pas transformée en travail; une portion Ri^2 sert à l'échauffement des conducteurs; le reste soit $e\,i$ se convertit en travail si nous faisons abstraction des pertes telles que frottements, hystérésis, courants de Foucault.

Par analogie avec l'expression similaire d'une génératrice, on appelle *rendement électrique du moteur* le rapport de cette puissance électrique $e\,i$, transformée en travail à la puissance totale reçue Ei, soit

$$R_{\text{élect.}} = \frac{e\,i}{E\,i} = \frac{e}{E}$$

De cette formule nous tirons des conséquences :

1° Si le moteur est au repos, la force contre-électromotrice est nulle et le rendement égale zéro;

2° S'il démarre, nous voyons e croître et R_e augmente lui-même, en même temps que le moteur demande un débit de plus en plus réduit. Toujours théoriquement et pour une vitesse suffisante, e atteint la valeur E et le rendement devient égal à l'unité. Mais alors $i = o$ et l'appareil, qui n'absorbe aucun travail, ne produit non plus aucun effet.

On peut se proposer de fixer le régime de l'électromoteur correspondant à une puissance mécanique disponible maxima. Nous avons, en désignant par P cette puissance

$$P = e\,i$$

ou, en remplaçant i par sa valeur tirée de (3) $\left(i = \frac{E - e}{R}\right)$

$$P = e\left(\frac{E - e}{R}\right)$$

P est donc fonction de e et prend sa valeur maxima pour

$$e = E - e$$

ou

$$e = \frac{E}{2}$$

Cette valeur de p est alors $\frac{E\,i}{2}$ c'est-à-dire la moitié de l'énergie dépensée et le rendement électrique égale 1/2. Disons de suite qu'on préfère ordinairement faire *travailler moins* le moteur mais à un *meilleur rendement.*

Ce rendement n'a d'ailleurs qu'une importance secondaire car la perte par effet Joule n'est pas la seule; il y a les frottements, l'hystérésis, les courants de Foucault qui absorbent ensemble une énergie α par seconde. Toute déduction faite, il reste une puissance p ($p = P —$) réellement recueillie et mesurable au frein sur l'arbre du

moteur. On appelle *rendement industriel* de la réceptrice le rapport de cette puissance utile p à la puissance reçue par le moteur E i

$$R_{indust} = \frac{p}{Ei}$$

L'expérience montre que la dynamo employée comme moteur a un rendement supérieur à celui qu'elle possède comme génératrice — cela au moins pour les machines de puissance peu élevée.

Calage des balais. — Lorsque le moteur est alimenté d'un courant électrique, on observe le même fait que dans la marche des dynamos : les balais crachent ; des étincelles jaillissent entre eux et le collecteur. Si l'on veut éviter cet effet, il faut caler les balais en arrière de la ligne neutre par rapport au mouvement. L'explication de ce déplacement est analogue à celle que nous avons reproduite pour les dynamos.

A propos de ce calage, il n'est pas inutile de dire que l'inclinaison des balais, s'ils sont métalliques, doit être en rapport avec le sens du mouvement. Ainsi, par exemple, si le sens est renversé comme nous l'avons vu dans la machine supposée en commençant, il faut nécessairement changer l'inclinaison des balais.

Caractéristique mécanique des moteurs. — La machine réceptrice prend, en général, une vitesse qui dépend de la charge qu'on lui donne. La relation de cette vitesse et de cette charge se représente par une courbe qui est la *caractéristique du moteur*. La construction en est assez simple : il suffit de faire travailler plus ou moins le moteur en relevant, pour chaque valeur du couple résistant, le nombre de tours exécutés pendant l'unité de temps.

Théoriquement, on pourrait chercher la valeur de cette vitesse. Si nous admettons que le couple moteur égale le couple résistant, ce qui est vrai quand nous négligeons les résistances passives, nous connaissons C ; la force électromotrice E de la génératrice nous est également connue et alors les trois équations

$$C = \frac{\mathfrak{N} n i}{2\pi}$$

$$i = \frac{E - e}{r}$$

$$e = \mathfrak{N} N n$$

auxquelles nous joignons

$$\mathfrak{N} = f(i)$$

nous permettent d'exprimer N en fonction de C, en éliminant $\mathfrak{N}$, i, e. La courbe représentée par l'équation obtenue est la *caractéristique mécanique* du moteur.



Rhéostats de démarrage. — Nous avons vu que l'intensité du courant absorbé par le moteur dépend de la vitesse de rotation. Au moment où ce courant est lancé dans la machine, la force contre-électromotrice n'existe pas encore et l'électromoteur constitue un véritable court-circuit. Pour éviter cet inconvénient, on a soin de toujours disposer, en série avec le moteur, un rhéostat de résistance variable. La valeur maxima est d'abord donnée à cette résistance de façon à réduire le plus possible l'intensité. Puis, quand le démarrage s'est produit, on retire progressivement les spires résistantes et le moteur finit par rester *seul* sur le circuit.

Le *rhéostat de démarrage* est d'ailleurs indépendant des *appareils de réglage* que l'on est souvent amené à employer.

Divers modes d'excitation des moteurs. — A la rigueur, toute machine dynamo ou magnéto peut servir de moteur. Mais cependant, dans la pratique, on laisse de côté généralement l'excitation séparée qui nécessite deux machines au lieu d'une seule. Nous examinerons successivement les excitations *série*, *shunt* et *composée*, et nous supposerons toujours ces divers moteurs alimentés sous une tension constante, ce qui est le cas le plus ordinaire.

Moteurs excités en série. — 1° *Sens de la rotation.* — Représentons schématiquement les inducteurs par le fil A, l'induit par le fil B. La figure 595 nous montre la machine fonctionnant comme génératrice; en *a* et en *b* nous avons les pôles, et les flèches indiquent le sens du courant obtenu. Relions ensuite la même

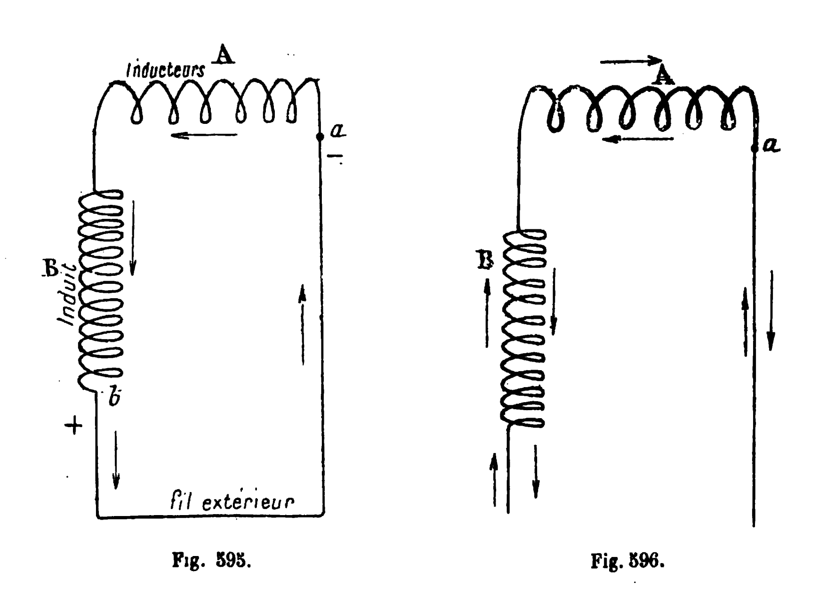


Fig. 595. Fig. 596.

machine à une ligne électrique; nous pouvons ainsi (fig. 596 flèches intérieures) conserver au courant son sens primitif dans l'inducteur et dans l'induit. Or nous savons

que le courant engendré (fig. 595) s'oppose à la continuation de la rotation; le moteur (fig. 596), libre de tourner, prend donc un mouvement contraire. Mais supposons ensuite que nous permutions les deux pôles de la dynamo (fig. 596, flèches extérieures); le courant est renversé à la fois dans l'inducteur et dans l'induit, et les réactions conservent évidemment leur direction : nous ne modifions pas ainsi le sens de la rotation du moteur.

Le moteur-série tourne toujours en sens contraire du mouvement qu'on devrait lui communiquer s'il servait de génératrice d'électricité.

Dans ce cas, les points de contact du collecteur et des frotteurs peuvent être conservés, mais il faut changer l'inclinaison des balais (fig. 597 et 598), si ces balais sont métalliques.

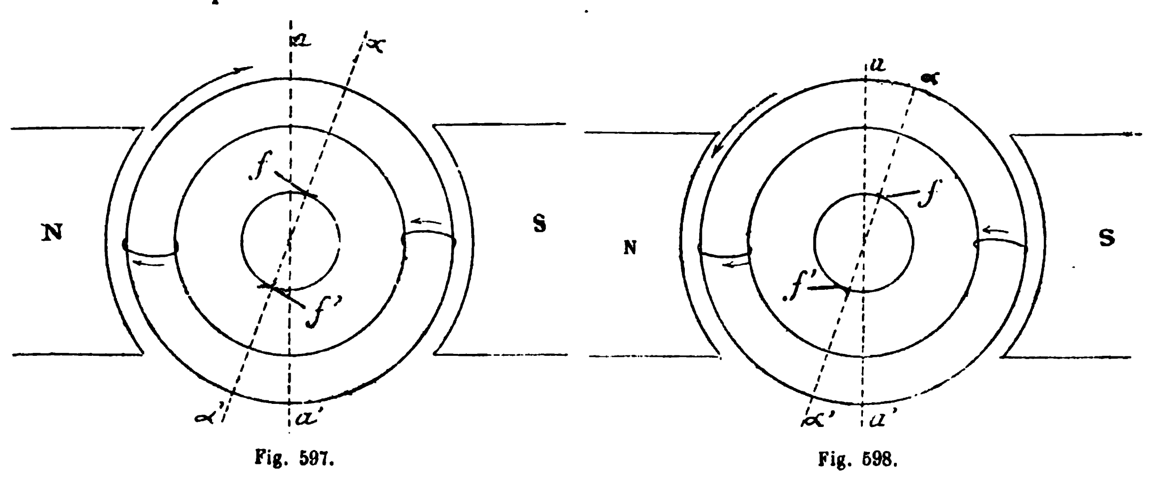


Fig. 597. Fig. 598.

2° *Calcul du couple moteur.* — Soit E la tension de la canalisation. Nous avons, au moment où le courant est lancé dans le moteur alors que le moteur est encore au repos, une intensité *maxima* i_0 donnée par la relation

$$i_0 = \frac{E}{R}$$

si nous appelons R la résistance intérieure du moteur, inducteur et induit réunis.

Le flux $\mathfrak{N}$, varie dans le même sens que les ampères-tours inducteurs; il prend donc au début une valeur *maxima* $\mathfrak{N}_0$ et le *couple moteur* passe aussi par sa *plus grande valeur* possible

$$C_0 = \frac{n i_0 \mathfrak{N}_0}{2\pi}$$

(couple au démarrage)

Si cette valeur dépasse celle du couple résistant, le moteur démarre. Mais aussitôt prend naissance la force contre-électromotrice, d'où résulte une diminution de l'intensité et du couple. Malgré cela la vitesse va d'abord en s'accélérant, et elle atteint sa

valeur normale quand il y a égalité entre les valeurs du couple moteur, convenablement réduit par la vitesse, et du couple résistant.

3° *Vitesse.* — Elle est intimement liée à la valeur du couple résistant. En effet nous avons écrit

$$C = \frac{n \mathfrak{N} i}{2\pi}$$

Il s'ensuit que l'intensité absorbée croît en même temps que le couple. Or nous savons d'autre part que

$$i = \frac{E - n N \mathfrak{N}}{R}$$

Nous en tirons

$$n N \mathfrak{N} = E - R i$$

et

$$N = \frac{E - Ri}{n \mathfrak{N}}$$

Dès lors nous voyons que :

1° Si la charge est nulle : $C = 0$, i est presque nulle, $\mathfrak{N}$ aussi et la valeur de N se réduit sensiblement à $\frac{E}{0}$ c'est-à-dire que le moteur, complètement déchargé, doit tourner avec une vitesse théoriquement infinie.

2° Si C augmente, i croît aussi, de même que $\mathfrak{N}$ et la vitesse diminue très rapidement jusqu'à s'annuler pour une charge de grandeur déterminée.

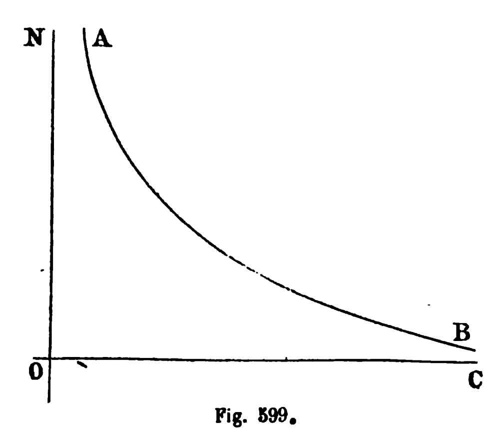


Fig. 599.

La figure 599 nous montre la forme de la *caractéristique* d'un tel moteur soumis à une charge constante.

Ce moteur en résumé présente les deux propriétés suivantes :

1° Couple très énergique au démarrage.

2° Variations de vitesse considérables même pour de faibles fluctuations de la charge.

Les moteurs-série sont surtout employés :

1° Dans les petites machines, quand on veut au démarrage un couple énergique (tramways, plaques tournantes, transbordeurs dans les gares, machines à battre, charrues..... en agriculture, etc.).

2° Lorsqu'il s'agit de transporter, à une *grande* distance, une énergie considérable à une machine *unique*. Dans ce cas on opère sous *haute tension.*

Généralement on adjoint au moteur divers accessoires :

1° un *rhéostat de démarrage* servant en même temps d'interrupteur, et permettant de réduire, quand le moteur n'est pas encore à sa vitesse normale, l'intensité exagérée provenant de l'absence ou de la faible valeur de la force contre-électromortice. Ces résistances sont ou métalliques ou liquides.

2° un *plomb fusible* destiné à couper le circuit, par sa fusion, quand l'intensité dépasse notablement sa valeur normale.

3° Si la *charge* du moteur peut s'annuler, il est bon de disposer un interrupteur automatique qui fonctionne dès que la vitesse atteint une trop grande valeur.

4° Un ampèremètre de contrôle (dans les moteurs importants), des *parafoudres* (dans le cas de lignes aériennes).

Moteurs excités en dérivation. — 1° *Sens de la rotation.* Soit (fig. 600) la dynamo fonctionnant comme génératrice; A est l'induit, B l'inducteur à fils fins et serrés. Les flèches indiquent le sens du courant engendré par la rotation de l'induit.

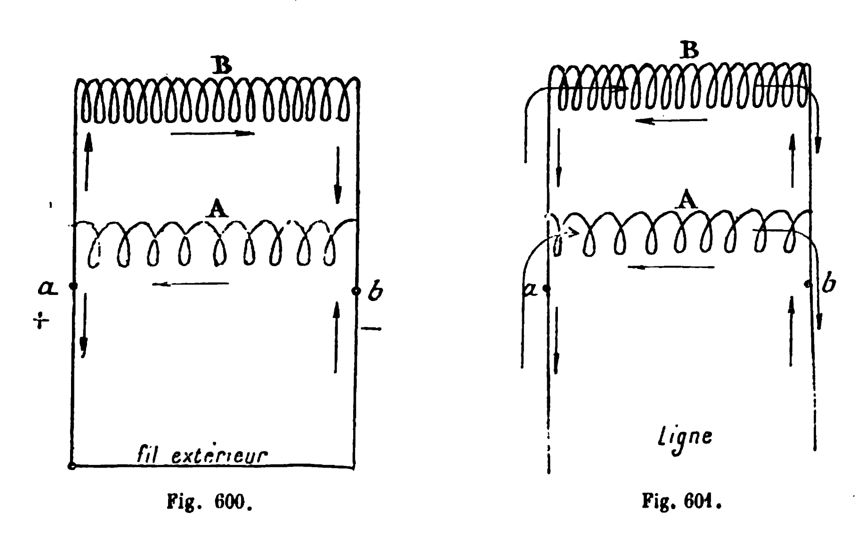


Fig. 600. Fig. 601.

Alimentons la machine (fig. 601, flèches intérieures) d'un courant concordant dans l'induit avec celui qu'on produisait (fig. 600); dans l'inducteur l'électricité est renversée, de sorte que les réactions entre les deux circuits sont contraires à celles qui existent dans la machine génératrice. Or, dans cette dernière, les actions s'opposent à la continuation du mouvement; nous aurons donc maintenant une rotation identique à celle de la dynamo.

Nous pouvons ensuite essayer l'action d'un courant contraire (fig. 601, flèches extérieures); l'inducteur et l'induit sont renversés et les réactions entre eux ne changent pas.

Ainsi une dynamo-shunt tourne toujours comme réceptrice dans le sens qu'il faut lui donner quand elle sert de génératrice.

Les balais n'ont pas à être changés de côté ; l'angle de calage seul demande une modification.

2° *Calcul du couple moteur.* — Soit E la tension de la distribution ; l'inducteur et l'induit forment deux dérivations dont les extrémités présentent la même différence de potentiel E. Appelons R la résistance des bobines inductrices ; le courant qui alimente ces bobines a pour intensité *invariable*

$$I = \frac{E}{R}$$

quelle que soit la marche du moteur.

Il résulte de là que le flux des inducteurs est constant et égal à $\mathfrak{N}$ et le couple moteur

$$C = \frac{\mathfrak{N} n i}{2\pi}$$

est proportionnel au courant i qui circule dans l'induit.

Au début, quand le moteur ne tourne pas encore, l'intensité i prend une valeur i_o, maxima donnée par le quotient

$$i_o = \frac{E}{r}$$

r étant la résistance de l'induit.

Alors le couple moteur prend également sa plus grande valeur C_o.

$$C_o = \frac{n \mathfrak{N} E}{2\pi r}$$

On remarque que ce couple *au démarrage* est en général moins grand ici que dans les machines en série puisque le facteur $\mathfrak{N}$ est actuellement une quantité constante.

Si cette valeur de C_0 dépasse celle du couple résistant, le moteur se met en mouvement : aussitôt naît la force contre-électromotrice qui diminue l'intensité dans l'induit et en même temps le couple moteur, proportionnel à l'intensité i. On atteint le régime normal quand les deux couples s'équivalent.

3° *Vitesse de régime.* — Nous avons

$$i = \frac{E - n N \mathfrak{N}}{r}$$

d'où l'on peut tirer

$$N = \frac{E - i r}{n \mathfrak{N}} \qquad (1)$$

D'autre part

$$C = \frac{n \mathfrak{N} i}{2\pi}$$

donne

$$i = \frac{2\pi C}{n \mathfrak{N}}$$

valeur qui, portée dans l'équation (1), nous conduit à

$$N = \frac{E}{n\mathfrak{N}} - \frac{2\pi r C}{n^2 \mathfrak{N}^2}$$

De ces formules nous tirons quelques conséquences :

1° A vide, $C = 0$, la vitesse de la machine tend vers la valeur limite

$$\frac{E}{n \mathfrak{N}}$$

d'autant *plus considérable* que *l'excitation des inducteurs* est plus *faible*. Nous sommes donc maîtres d'*accélérer* cette allure du moteur déchargé en mettant des *résistances supplémentaires* dans l'inducteur.

Dans ces conditions de marche, le moteur ne demande théoriquement aucun courant à la canalisation. En fait on doit lui fournir une énergie égale aux résistances passives.

2° A mesure que l'on *charge* le moteur, la *vitesse diminue* en progression arithmétique, d'après la formule (2) et en supposant $\mathfrak{N}$ constant. Mais nous remarquons qu'en réalité $\mathfrak{N}$ varie par suite de la réaction d'induit : quand C augmente, i croît aussi et $\mathfrak{N}$ diminue, ce qui tend à accélérer la rotation. La résultante de ces deux actions diminue la vitesse du moteur, mais cette variation est assez lente — d'autant plus lente d'ailleurs que l'excitation des inducteurs est plus considérable.

Nous pouvons donc énoncer cette proposition :

Dans un moteur-shunt, alimenté sous une tension constante, la vitesse varie peu avec la charge.

Cette propriété est la réciproque de celle que nous avons énoncée au sujet des dynamos de même enroulement : à vitesse constante, la tension varie peu avec le débit.

3° Pour une trop forte charge, le moteur ne peut pas tourner ; il suffit en effet que l'on ait pour cela

$$N = 0 = \frac{E}{n \mathfrak{N}} - \frac{2\pi r C}{n^2 \mathfrak{N}^2}$$

c'est-à-dire

$$E = \frac{2\pi r C}{n \mathfrak{N}}$$

d'où

$$C = \frac{E n \mathfrak{N}}{2\pi r}$$

On peut, comme on le voit, reculer cette limite, au moyen des ressources dont on

dispose généralement dans le cas d'une machine en dérivation, c'est-à-dire en augmentant l'excitation par diminution de la résistance des inducteurs (en retirant tout le rhéostat du circuit).

On remarque d'ailleurs que cette limite C_0 de la charge est égale à la valeur C_0 que nous avons trouvée pour le couple maximum au démarrage (page 586). Le mouvement est bien impossible.

La caractéristique mécanique d'un moteur excité en dérivation est tracée (fig. 602)

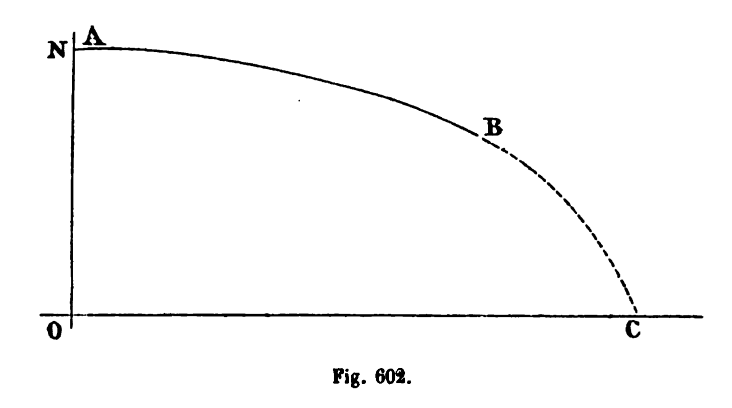


Fig. 602.

en trait plein telle que la donne l'expérience ; on l'a continuée en pointillé pour la région non utilisable où le moteur ne tourne pas à un régime mesurable.

4° L'uniformité approximative de la marche d'un moteur en dérivation est quelquefois un inconvénient, car il peut être souvent utile de faire varier, entre certaines limites, la vitesse des machines-outils entraînées. Cherchons quelle peut être l'influence du rhéostat d'excitation sur cette vitesse. Supposons pour cela la charge constante. Nous avons alors $i =$ const. et, de la formule (1), nous concluons que si nous voulons augmenter la vitesse, il faut réduire l'excitation $\mathfrak{N}$ c'est-à-dire introduire de nouvelles résistances dans le circuit des inducteurs.

D'autres dispositions ont été imaginées, pour rendre variable l'allure de l'électromoteur ; l'une d'elles consiste à faire usage de deux induits, au lieu d'un seul, munis chacun d'un collecteur ; si une vitesse modérée suffit, on dispose en tension les deux bobinages ; au contraire une mise en quantité accélère la marche et il est d'ailleurs possible d'agir, dans chacun des cas sur le rhéostat d'excitation de façon à modifier encore la vitesse.

Les moteurs en dérivation sont les plus généralement employés ; ils conviennent pour les machines-outils de toutes sortes, excepté pour les quelques cas cités au paragraphe précédent.

Chaque moteur-shunt demande comme appareils accessoires :

1° Un *rhéostat de démarrage* dans le but de modérer l'intensité au moment de la mise en marche. Cette résistance est ensuite retirée progressivement du circuit ; elle peut se placer de deux manières différentes :

a) Sur le branchement qui relie le moteur à la ligne. Alors on modère évidemment le courant aussi bien dans les inducteurs que dans l'induit (fig. 604).

b) Si l'on veut démarrer plus facilement, on dispose le rhéostat sur l'*induit seulement* et l'on a ainsi la disposition de la figure 605.

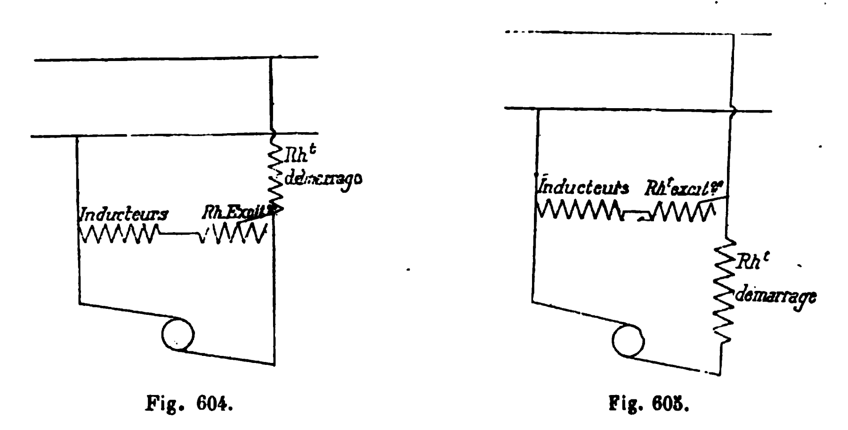


Fig. 604. Fig. 605.

2° Un *coupe-circuit* à fil fusible pour éviter l'excès d'intensité à un instant quelconque de la marche.

3° Souvent un *interrupteur automatique* à minimum, coupant le circuit de l'électromoteur quand l'intensité est voisine de zéro, cela dans le cas d'appareils devant fonctionner ensemble jusqu'à l'arrêt de la génératrice. Si on ne prenait pas cette précaution, il arriverait qu'à la mise en marche de la dynamo, tous les rhéostats de démarrage étant en court-circuit, il y aurait un excès de courant dans chacun d'eux.

4° Un ampèremètre de contrôle pour chaque moteur puissant.

Moteurs à excitations composées. — Nous avons vu que, dans les moteurs en série, la vitesse augmente beaucoup pour une faible décharge de la machine ; dans les moteurs-shunt, la même décharge accélère également l'allure mais d'une façon très faible.

Les deux courbes caractéristiques reproduites précédemment mettent ces faits en évidence.

Si nous voulons un moteur de marche absolument régulière, quel que soit le travail demandé, nous pourrons chercher à combiner les deux enroulements précédents; mais naturellement une excitation, somme des deux précédents, ne saurait convenir. Elle est inférieure à la dérivation à ce point de vue, car elle participe des propriétés de la série et du shunt et nous donne une caractéristique de la forme (fig. 606),

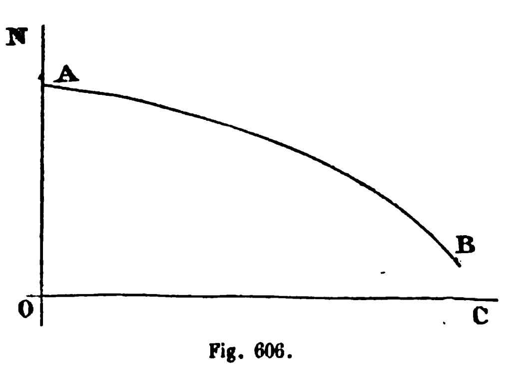


Fig. 606.

la décroissance de vitesse, par l'effet de la charge, est intermédiaire entre celles d'un moteur-série et d'un moteur-dérivation.

Pour obtenir une marche absolument constante, il faut donc rendre *discordants* les ampères-tours de ces deux enroulements ; en effet supposons que la charge augmente dans un moteur-dérivation ; la vitesse diminue un peu ; disposons sur les électros quelques spires-série parcourues par le courant principal mais en sens *inverse* des boucles dérivées. Ces ampères-tours produisent un effet contraire à celui qu'ils donneraient dans un moteur-série, c'est-à-dire qu'ils tendent à accélérer la marche ; on peut donc obtenir ainsi une compensation exacte. La caractéristique du moteur est alors une droite parallèle à l'axe OC.

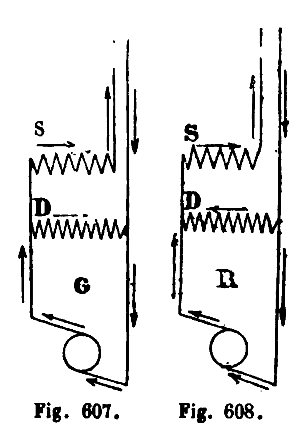
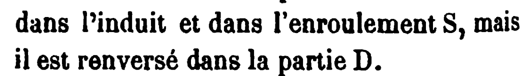


Fig. 607. Fig. 608.

Remarquons maintenant qu'une *dynamo compound,* sans aucun changement de connexions, se comporte comme l'appareil que nous venons de constituer; en effet soit (fig. 607) la dynamo compound servant de génératrice ; les sens sont concordants dans les deux parties D et S des bobines. Faisons ensuite passer dans la machine (fig. 608) le courant d'une source étrangère ; le sens de courant primitif est conservé dans l'induit et dans l'enroulement S, mais il est renversé dans la partie D.



On a ainsi la disposition de la figure 609. Mais ce système présente quelquefois des inconvénients : par l'effet d'une brusque surcharge, l'enroulement-série peut prédominer (*i* considérable à ce moment) ; les pôles alors s'inversent et le moteur s'arrête pour repartir en sens contraire comme une machine-série. Le même fait pourrait se produire au démarrage.

Fig. 609.

Dans certains cas, on dispose le circuit-série de manière à pouvoir être renversé au moment de la mise en marche ; de cette façon, le moteur est à la fois *série* et *shunt* et il possède un couple puissant. Dès que le régime normal est obtenu on rend à l'enroulement série sa première disposition.

Nous remarquons encore ici la réciprocité des propriétés d'une même machine servant de *génératrice* ou de *réceptrice*.

La dynamo compound, employée comme moteur et sous une tension invariable, tourne à vitesse constante.

Renversement de marche. — Cette opération est fréquemment utile, par

exemple dans les tramways électriques. Il faut, pour obtenir le renversement de marche, changer le sens du courant soit dans l'inducteur, soit dans l'induit. (Nous savons que la permutation des bornes du moteur sur le circuit ne produit aucun effet.)

Il y a deux manières de renverser le courant dans l'induit seulement :

1° Par déplacement des balais sur le collecteur ;

2° Par un commutateur spécial.

1° La figure 610 indique le premier moyen : deux pièces basculant autour des points *o* et *o*' sont manœuvrées en même temps par le levier L ; chacune porte deux balais de charbon *a*, *b*, *a*', *b*'. Les fils de la ligne aboutissent aux points fixes *o* et *o*'. Avec la position actuelle du levier, on appuie sur le collecteur les balais *b* et *b*' ; le courant

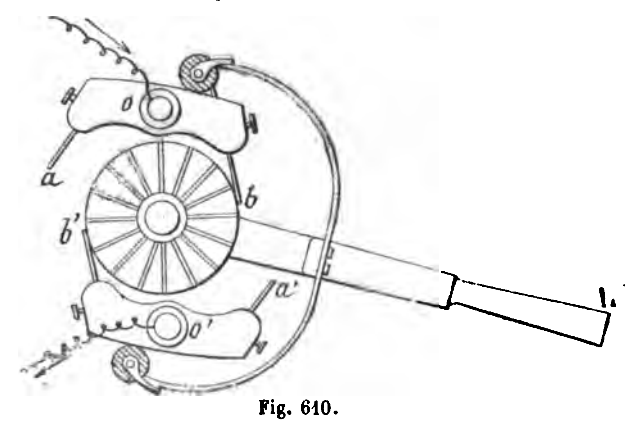


Fig. 610.

entre par la droite pour sortir à gauche. Au contraire, si on relève L, *a* et *a*' viennent se substituer à *b*' et à *b* ; le courant entre par la gauche et sort à droite : il a donc changé de sens dans l'induit.

2° Généralement on préfère renverser le courant par le jeu d'un commutateur sans toucher aux balais. Ces balais sont toujours alors en charbon, ce qui diminue beaucoup les étincelles au collecteur. On a d'ailleurs le soin, avant de changer le courant, de réduire, au moyen du rhéostat, l'intensité à une faible valeur. Le renversement se fait ensuite sans difficulté.

Un système tout particulier, pour effectuer cette manœuvre, consiste à employer l'*appareil Sprague* : les deux bobines inductrices sont montées en dérivation sur la ligne ; quant à l'induit, ses extémités *c* et *c*' aboutissent à deux contacts glissant le long des bobines (fig. 611). Si les positions données à ces points de liaison sont les milieux de *ab* et de *a'b'*, aucun courant ne passe dans l'anneau, car ses extrémités sont au même potentiel ; mais si l'on déplace les points *c* et *c*' dans des sens différents, on obtient dans l'in-

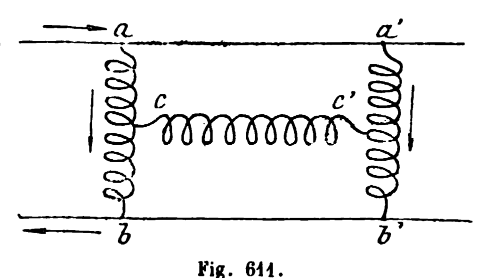


Fig. 611.

duit un courant d'autant plus intense que les points c et c' sont plus écartés ; il est renversé si nous changeons le sens du déplacement des contacts. On possède alors un mode de renversement et de réglage du moteur.

Formes des moteurs à courant continu. — Toutes les dynamos sont applicables comme réceptrices, mais suivant les usages auxquels la puissance mécanique est destinée, on modifie la forme du moteur.



Fig. 612.

La figure 612 représente un petit moteur *Siemens et Halske* spécial pour faibles puissances; il est muni d'un cône à étages qui permet d'obtenir une série de vitesses.

Nous avons rencontré, en traitant des dynamos, un certain nombre de modèles qui ont été signalés comme particulièrement commodes dans leur emploi comme moteurs.

CHAPITRE II

MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS EN GÉNÉRAL

Sous le nom de *moteurs à courants alternatifs* ou encore d'*alternomoteurs*, on désigne des appareils, de disposition variable, capables de se mouvoir sous l'action de courants alternatifs.

Ces machines peuvent se diviser en un certain nombre de catégories ; mais avant d'indiquer cette classification, nous allons montrer qu'une *dynamo ordinaire* peut à l'occasion servir d'*alternomoteur*.

Alternomoteurs à collecteur. — Considérons une dynamo auto-excitatrice quelconque; nous savons qu'elle tourne, sous l'action d'un courant *continu* dans un *sens invariable* quel que soit le sens du courant employé : si l'excitation a lieu en série la rotation est *inverse*, si les inducteurs sont en shunt, le mouvement est *direct* (par rapport au sens de la machine servant de génératrice). On en conclut que cette dynamo, alimentée de courants constamment inversés, c'est-à-dire de courants alternatifs, prend un mouvement déterminé : elle constitue donc un alternomoteur. Mais en réalité, pour utiliser commodément une telle machine, il y a lieu d'apporter à sa construction un certain nombre de modifications. En effet nous remarquons que :

1° Les *inducteurs* sont traversés par des courants alternatifs et leurs noyaux deviennent le siège de courants de Foucault ;

2° Dans ces mêmes pièces se fait, pour la même raison, sentir l'hystérésis, localisée ordinairement dans l'induit seul.

3° Les inducteurs et l'induit constituant des circuits de réactance considérable, nous avons, comme conséquences de la forte valeur de la self-induction :

a) une diminution considérable de la force électromotrice,

b) une augmentation notable du retard du courant sur la force électromotrice et, comme résultat de ces deux influences *a*) et *b*), une forte diminution des puissances absorbée et aussi rendue par le moteur. (Le facteur de puissance est affaibli).

c) La self-induction se manifeste encore par des étincelles très nourries au collecteur.

En résumé nous avons à combattre la self-induction, les courants de Foucault et l'hystérésis.

On diminue du même coup ces trois influences par l'adoption de courants de basse fréquence : $n = 40$, par exemple.

Pour s'attaquer spécialement à la self-induction, on rejette les moteurs en shunt pour conserver l'excitation-série qui comporte un moindre nombre de spires inductrices.

Les courants de Foucault sont combattus par l'emploi de *noyaux feuilletés* dans les inducteurs ; mais cette modification n'influe pas sur les phénomènes d'hystérésis ; pour les réduire, il faut :

a) choisir le fer employé, l'étudier à l'hystérésimètre ;

b) réduire la section des noyaux, en y maintenant, par compensation, le magnétisme à saturation.

Ce genre de moteurs présente l'avantage de posséder, au démarrage, un couple énergique, ce qui leur permet de démarrer sous charge, circonstance peu commune chez les alternomoteurs et très utile quand il s'agit, par exemple, d'ascenseurs.

On leur reproche leur faible facteur de puissance : pour un travail déterminé, le moteur est plus important que dans tout autre système.

Classification des moteurs alternatifs. — Nous pouvons, si nous mettons de côté le modèle précédent, diviser les alternomoteurs en plusieurs catégories :

1° Les uns, basés sur la réversibilité des alternateurs, sont assujettis à tourner avec une vitesse réglée sur celle de la génératrice, c'est-à-dire en synchronisme avec la pulsation du courant. On les appelle *moteurs synchrones*.

2° Les autres reçoivent le courant alternatif dans leurs parties fixes seulement ; une armature séparée et mobile est alors le siège de courants induits dont la réaction sur les inducteurs provoque le mouvement. Cette vitesse de rotation n'est pas forcément réglée sur la pulsation des courants, d'où le nom de moteurs *asynchrones* réservé à ces machines. En raison du mode de génération des courants, on dit encore *moteurs à induction*.

Si en outre nous considérons le genre des courants alternatifs utilisés nous obtenons, dans chacune des classes précédentes, deux catégories, suivant que les courants sont *mono* ou *polyphasés*. En définitive nous avons donc à examiner :

Les moteurs synchrones monophasés.
— — polyphasés.
— asynchrones monophasés.
— — polyphasés.



CHAPITRE III

MOTEURS MONOPHASÉS SYNCHRONES

Réversibilité des alternateurs. — Considérons en 1 (fig. 613) la machine qui nous a servi à expliquer la génération des courants alternatifs (page 448). Soit

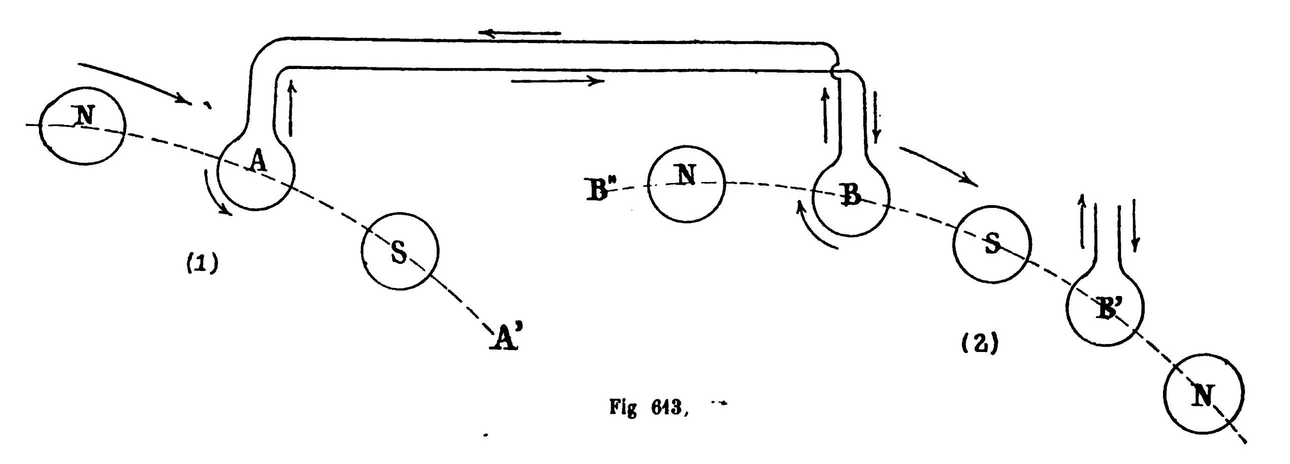


Fig 613.

l'une des bobines A, située, à un moment donné, entre un pôle N et un autre S ; elle est le siège d'un courant, marqué par la flèche, qui s'oppose, d'après la loi de Lenz, à la continuation du mouvement.

Relions cette bobine à l'enroulement correspondant B d'un second alternateur (2) semblable au premier, dont les inducteurs sont alimentés de courant continu. Etant donnée la manière, figurée sur le dessin, d'établir la liaison, le courant de B est *contraire* du courant de A. Or, d'après la loi de Lenz, A tend à marcher de S vers N ; donc B va tourner dans le sens NS, c'est-à-dire de la même manière que la génératrice.

Cela est vrai quand B occupe la situation B.

Si la bobine réceptrice était devant un pôle N ou S, l'action serait nulle.

Si elle se trouvait en B', parcourue par le même courant, l'action serait contraire et

le mouvement tendrait à se produire dans le sens opposé à celui que nous avons trouvé.

En résumé admettons que la bobine réceptrice, alimentée d'un courant *invariable*, tourne entre les pôles successifs; elle est soumise à une série de forces alternativement dans un sens et dans l'autre, séparées par des *points morts* N, S, etc.

Lançons donc la machine (2) et abandonnons-la à elle-même quand B occupe une région telle que NS, position B; la partie mobile est soumise à une force accélératrice qui fait dépasser à B la position S. Mais, à ce moment, le courant (position A′) est renversé; il passe dans B′ et exerce une action concordante sur cette bobine et ainsi de suite. Le moteur est animé d'un mouvement continu et de vitesse telle qu'un intervalle polaire de la réceptrice soit parcouru en un temps égal à celui que met la bobine génératrice à franchir le même espace: il y a donc *synchronisme* entre les deux mouvements.

Nous avons considéré une bobine unique dans chaque machine; le mouvement est évidemment le même si nous munissons chacune d'un égal nombre d'enroulements de manière que A et B se correspondent; de même A′ et B′, etc.

Les *alternateurs* sont donc *réversibles* et ils constituent ainsi des *moteurs synchrones*. Ce mot d'ailleurs n'implique pas forcément l'idée d'une égale vitesse dans les deux machines. Supposons en effet au courant alternatif une fréquence n; la vitesse de la réceptrice sera, si elle possède $2p$ pôles

$$\frac{2\pi n}{p}$$

comme il est facile de s'en convaincre.

Si, pour une raison quelconque, le mouvement réel retardait sur cette vitesse, le raisonnement employé ne serait plus applicable et la machine s'arrêterait rapidement; on dit alors qu'elle tombe *hors de phase* ou bien qu'elle se *décroche*.

Remarquons d'ailleurs que, si nous avions supposé la spire B portée initialement vers B″ nous aurions donné à la réceptrice un mouvement contraire à celui que nous lui avons communiqué; tout dépend donc de l'impulsion première.

Ces moteurs, en raison du mode d'excitation de leurs inducteurs (par courant continu) sont souvent appelés *moteurs à champ constant*.

Propriétés des moteurs synchrones. — 1° Ces alternomoteurs ne démarrent pas seuls; ils demandent généralement un lancé initial, comme les moteurs à gaz. On doit avant de leur donner leur charge, les amener en synchronisme et on y arrive par une série variée d'artifices parmi lesquels nous citerons les suivants :

a) On fait usage d'un *moteur auxiliaire de démarrage*, lequel est *asynchrone*. Cette machine, séparée d'abord du moteur synchrone, démarre facilement puisqu'elle est *à vide*; dès qu'elle a pris la vitesse voulue, on l'accouple au moteur synchrone par un plateau à friction. Ce dernier, également *déchargé*, prend ainsi sa vitesse de

synchronisme. A ce moment on met sur la ligne le moteur synchrone toujours à vide et on débraye l'auxiliaire, puis on relie enfin le moteur à la transmission qu'il doit actionner, au moyen d'un accouplement à friction. La puissance du moteur auxiliaire est bien entendu inférieure à celle que l'on doit utiliser et égale aux résistances passives du récepteur synchrone.

b) On arrive à un *auto-démarrage*, en utilisant d'abord le moteur comme *asynchrone* ; pour cela, supprimant l'excitation continue, on lance dans l'induit le courant de la ligne en interposant une forte bobine de self qui modère l'intensité du courant employé. C'est ainsi que démarrent beaucoup de moteurs synchrones en Amérique et notamment ceux qui sont alimentés par le courant du Niagara.

c) Dans le cas particulier d'un moteur accouplé à une dynamo continue destinée à la charge des accumulateurs, on peut faire usage du courant de décharge de cette batterie pour faire tourner la dynamo en électromoteur. Quand le synchronisme est ainsi atteint, on supprime l'artifice et l'on met l'alternomoteur sur la ligne. Il reste ensuite à effectuer progressivement la charge mécanique.

2° On ne peut évidemment pas démarrer en charge, mais on opère, comme on l'a dit déjà, progressivement et ordinairement au moyen d'embrayages à friction.

3° Supposons le moteur en marche et en charge. Si, à un moment donné, nous augmentons le travail demandé, le premier effet est une réduction de la vitesse. Il en résulte une diminution de la force contre-électromotrice et par suite un accroissement de l'intensité absorbée; de cet accroissement de l'énergie prise à la ligne découle une accélération qui permet au moteur de rattraper le synchronisme. Si la surcharge était forte, une pareille compensation ne pourrait plus s'établir et le moteur tomberait *hors de phase* ; il se *décrocherait*. Pendant l'arrêt, si le courant n'est pas rompu, l'intensité absorbée est considérable, tempérée seulement par la grande valeur de la self-induction. Ce décrochage pourrait encore être le fait d'une interruption du courant dans la ligne et le moteur, maintenant au repos, recevrait, au moment du rétablissement de courant, une intensité considérable, tout en restant immobile jusqu'à une intervention spéciale. Ces moteurs ne peuvent donc pas être abandonnés à eux-mêmes.

Déchargé, le moteur synchrone ne peut pas s'emballer et il est ramené au synchronisme même si la décharge est totale. Cependant, dans certains cas, lorsque par exemple la charge du moteur possède un grand moment d'inertie, on peut constater le décrochage du moteur.

4° Le moteur synchrone réagit sur la génératrice et sur la ligne : il modifie la forme de la courbe du courant, la fréquence et la tension de l'alternateur ; il influe donc sur les autres moteurs du même genre alimentés par la ligne.

5° Il nécessite des appareils spéciaux pour assurer l'excitation de ses électros.

6° L'intensité prise par le moteur à la canalisation dépend de l'excitation de cette machine. Si, à *charge* constante, on augmente cette excitation, on constate une diminution de l'intensité absorbée en même temps que le décalage du courant sur la f. é. m. va en décroissant. Cette variation continue jusqu'à un minimum de courant, coïn-



cidant avec un décalage nul, puis, si les inducteurs continuent à être excités de plus en plus fortement, l'intensité du courant pris à la ligne augmente, en même temps que s'établit une *avance* de phase du courant sur la f. é. m. Cet effet, semblable à celui que produisent les condensateurs, peut neutraliser le décalage en arrière qui est dû aux divers récepteurs de la ligne.

7° En raison des quelques propriétés énoncées, les moteurs synchrones ne doivent pas être abandonnés à eux-mêmes; ils sont donc contre-indiqués comme récepteurs isolés tandis qu'ils peuvent s'employer dans les sous-stations où s'exerce une surveillance continue.

Excitation des moteurs synchrones. — D'une façon générale, tout alternateur peut servir de moteur mais il faut assurer l'excitation de la machine réceptrice et pour cela il y a divers moyens :

1° Employer une dynamo continue spéciale. Mais cette complication n'est admissible que dans le cas d'une unité considérable. Le plus souvent le moteur synchrone est chargé lui-même d'entraîner l'excitatrice. Cette dernière machine alimente ordinairement une petite batterie d'accumulateurs dont le rôle est de concourir au démarrage soit par la rotation de la dynamo comme moteur, soit seulement par l'excitation des électros pendant la période de départ ;

2° On peut encore exciter les électros par une portion du courant alternatif redressé. Nous avons vu déjà comment, dans certains alternateurs *Ganz*, on fait la conversion ; lorsqu'il s'agit d'un moteur, on emploie ordinairement des balais doubles (fig. 614)

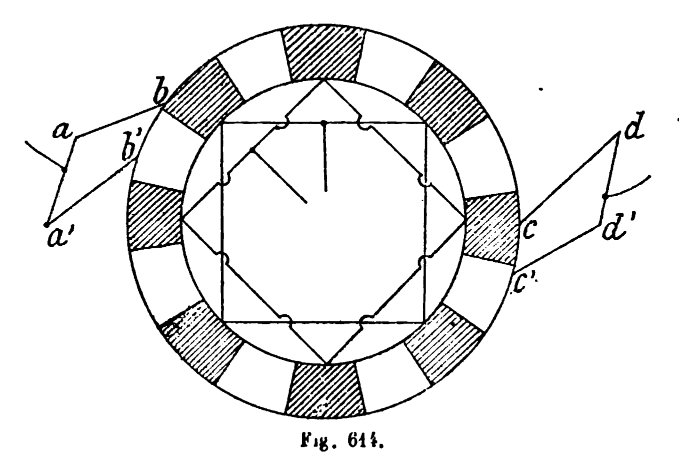


Fig. 614.

pour chaque connexion. Il est ordinairement nécessaire d'abaisser en même temps la tension du courant; dans ce cas un transformateur est adjoint au redresseur précédent de manière que le secondaire alimente le commutateur.

Ces moteurs ont un rendement à peu près égal à celui des électromoteurs.

CHAPITRE IV

MOTEURS POLYPHASÉS SYNCHRONES

Réversibilité des alternateurs polyphasés. — Il est très facile d'étendre aux alternateurs polyphasés la propriété qui a été indiquée (page 595) pour les alternateurs à une seule phase.

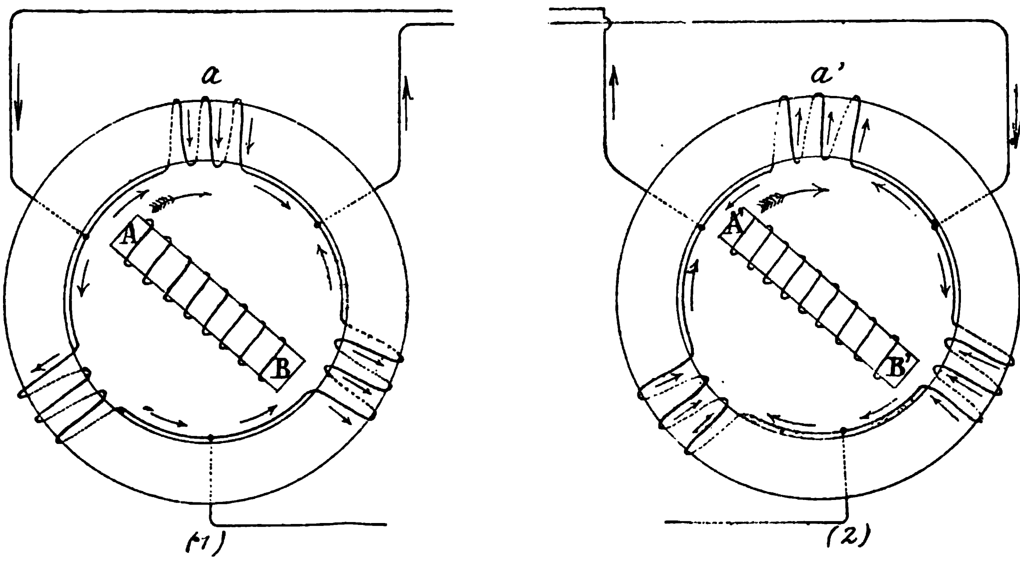


Fig. 615.

Nous allons d'ailleurs prendre directement un cas particulièrement simple de machines à trois phases ; soit (fig. 615) une génératrice constituée par un électro AB, alimenté de courant continu et tournant à l'intérieur d'un anneau magnétique recouvert de trois bobines telles que a ; nous obtenons ainsi des courants triphasés. Réunissons chaque section de l'induit à la section semblable d'une seconde machine identique à la première en ayant soin de renverser les courants dans la réceptrice. L'application de la loi de Lenz nous montre que (2) doit tourner dans le même sens que (1). Il en serait exactement ainsi encore si les pôles mobiles étaient en nombre quelconque. On en conclut donc la réversibilité de l'alternateur.

Pour la même raison que précédemment la réceptriee tourne, en lui supposant un nombre de pôles égal à celui de la génératrice, avec la vitesse de (1). S'il n'en est pas ainsi le moteur tombe hors de phase et se décroche.

Les propriétés que nous avons énoncées, pour le cas de moteurs synchrones monophasés sont applicables ici (voir page 596).

Au lieu de la disposition adoptée, qui est celle de la plupart des alternateurs, on peut prendre la réciproque c'est-à-dire faire tourner l'anneau par rapport aux pôles inducteurs fixes. Soient donc deux machines genre Gramme (fig. 616) disposées pour

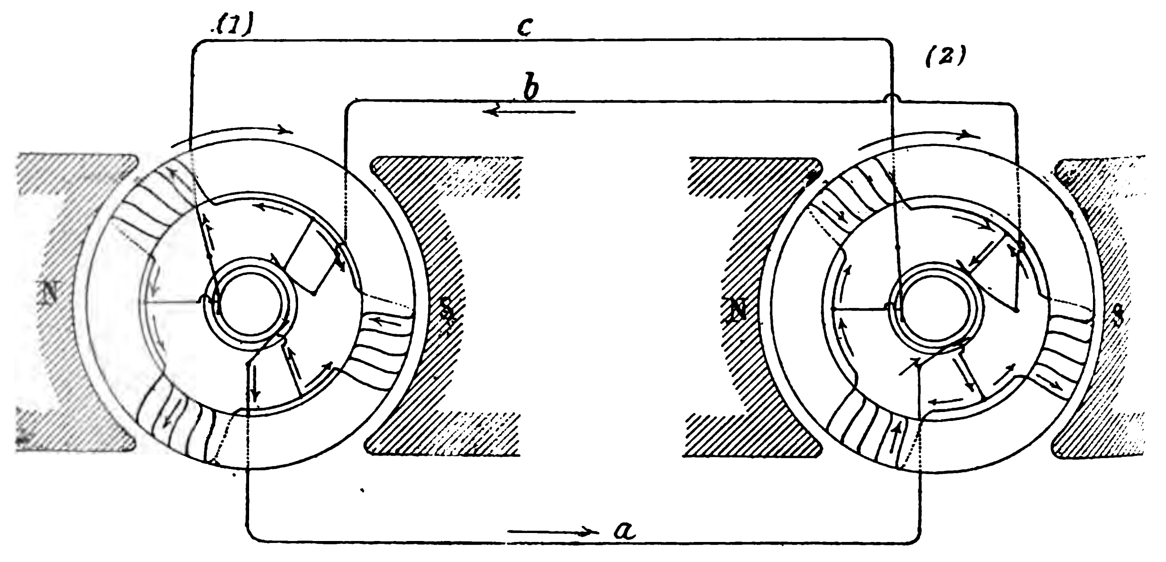


Fig. 616.

engendrer des courants triphasés ; les sections mobiles étant reliées par trois fils et par l'intermédiaire de bagues collectrices, nous voyons que (2) tourne dans le sens de (1).

Le raisonnement d'ailleurs n'est ici encore applicable que si les positions des deux induits restent toujours identiques par rapport aux inducteurs ; le *synchronisme* est donc nécessaire. Certains moteurs (Schuckert par exemple) sont disposés sur ce dernier modèle.

Dans ces divers moteurs synchrones, il faut, pour l'excitation, du courant continu. Cette électricité peut être obtenue, dans le cas particulier qui nous occupe, en disposant dans l'induit lui-même quelques spires supplémentaires avec collecteur Gramme.

On peut encore monter sur l'arbre une petite dynamo continue.

Le démarrage de ces moteurs peut être spontané à vide ; il a lieu alors par la réaction de l'induit (qui engendre un champ tournant) sur l'inducteur. Quand le synchronisme est atteint, on procède à l'alimentation ordinaire des inducteurs et la charge est établie progressivement.

CHAPITRE V

MOTEURS ASYNCHRONES A CHAMP TOURNANT

D'une manière générale, un *moteur asynchrone* est celui dont la vitesse n'est pas intimement liée à la pulsation du courant employé. Suivant la nature de ce courant, on peut considérer deux sortes d'alternomoteurs asynchrones :

Les moteurs asynchrones monophasés
— — polyphasés.

Ces derniers seront étudiés les premiers sous le nom de *moteurs asynchrones à champ tournant*.

Les machines asynchrones, quel que soit le nombre des phases, comprennent deux parties : un inducteur recevant le courant de la ligne et un induit soumis à l'influence des premiers circuits. C'est la réaction des deux courants l'un sur l'autre qui entraîne la partie mobile, d'où le nom de *moteurs à induction* donné à ces appareils.

Dans les modèles courants l'*inducteur* est *fixe* ; on lui donne le nom de *stator* ; l'induit se déplace au contraire ; c'est le *rotor*. Cette disposition peut d'ailleurs être renversée, surtout pour les modèles puissants.

Principe des moteurs à champ tournant. — Nous avons vu déjà (page 435) la production des champs tournants au moyen des courants polyphasés. Nous savons d'autre part que, dans un champ semblable (expérience d'Arago, page 228) une masse métallique mobile est entraînée dans le sens des lignes de force.

Au lieu d'employer une simple masse métallique, nous pouvons faire usage comme *rotor* d'un véritable induit. Le cas est alors assimilable au suivant :

Soit une dynamo ou un alternateur dont nous supposons l'inducteur mobile autour de l'induit. Cette pièce mobile crée un champ constant d'intensité mais qui se déplace d'une façon continue, c'est-à-dire un véritable *champ tournant*. Admettons encore que l'induit soit libre de tourner ; il est le siège de courants dus à la rotation des inducteurs et ces courants s'opposent, d'après la loi de Lenz, à la continuation du déplacement relatif de l'inducteur et de l'induit. Si ce dernier est libre, il prend donc, *en*

l'absence d'action contraire, une vitesse *égale* à celle de la partie mobile. *A vide*, le moteur marche donc *en synchronisme* avec le courant. Il n'en est plus de même si nous chargeons la machine ; alors un retard de la rotation sur la pulsation se fait sentir et cette différence de vitesse s'appelle le *glissement*. C'est d'ailleurs en vertu de cette inégalité de vitesse, que l'induction peut se produire.

Calcul du couple moteur. — Soit sur l'induit *une simple spire* entourant toute l'armature. Appelons :

ω la pulsation du courant employé (nous savons que c'est aussi la vitesse de rotation du champ).

ω' la vitesse de rotation de l'induit.

Le glissement est alors $\omega_1 = \omega - \omega'$.

Soit $\mathfrak{M}$ la valeur maxima que prend le flux de force (au moment où le cadre est par conséquent perpendiculaire à la direction de ces lignes. Si nous nous reportons au raisonnement employé page 216, nous trouvons que le maximum de la force électromotrice induite dans le cadre quand nous le faisons tourner avec la *vitesse relative* ω_1 sur le champ, a pour valeur

$$E = \omega_1 \mathfrak{M}$$

C'est encore la force contre-électromotrice résultant de la rotation du moteur.

De cette valeur *maxima* nous passons à la valeur efficace E_e par la formule $E_e = E\frac{\sqrt{2}}{2}$, ce qui nous donne

$$E_e = \frac{\sqrt{2}}{2}\omega_1 \mathfrak{M}$$

Si nous désignons par r la résistance ohmique du circuit et par l son coefficient de self, nous avons une résistance apparente égale à

$$\sqrt{r^2 + \omega_1 l^2}$$

ce qui nous donne pour l'intensité efficace du courant *induit*

$$I_e = \frac{\sqrt{2}}{2}\frac{\omega_1 \mathfrak{M}}{\sqrt{r^2 + \omega_1^2 l^2}}$$

Dès lors la puissance absorbée par la rotation s'exprime par

$$P = E_e \times I_e \times \cos\varphi = \frac{\sqrt{2}}{2}\omega_1 \mathfrak{M} \times \frac{\sqrt{2}}{2}\frac{\omega_1 \mathfrak{M}}{\sqrt{r^2 + \omega_1^2 l^2}} \times \cos\varphi$$

Mais $\cos\varphi$ se tire de la formule

$$\mathrm{tg}\,\varphi = \frac{\omega_1 l}{r}$$

qui donne

$$\cos \varphi = \frac{r}{\sqrt{r^2 + \omega_1^2 l^2}}$$

d'où enfin

$$P = \frac{\sqrt{2}}{2} \omega_1 \mathfrak{N} \times \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\omega_1 \mathfrak{N}}{\sqrt{r^2 + \omega_1^2 l^2}} \times \frac{r}{\sqrt{r^2 + \omega_1^2 l^2}}$$

$$(1) \qquad = \frac{1}{2} \frac{\omega_1^2 \mathfrak{N}^2 r}{r^2 + \omega_1^2 l^2}$$

Cette puissance s'exprime encore par

$$(2) \qquad P = c\,\omega_1$$

si nous appelons c le *couple moteur*. On tire de l'égalité de (1) et de (2)

$$c = \frac{1}{2} \frac{\omega_1 \mathfrak{N}^2 r}{r^2 + \omega_1^2 l^2}$$

Nous avons supposé une seule spire entourant le tambour; si nous en prenons n, un calcul analogue nous montrerait que le couple obtenu a une expression semblable à la précédente, avec cette différence que le numérateur doit être multiplié par n et que nous devons remplacer la résistance r et le coefficient de self l de la spire unique par R et L relatifs à l'ensemble des bobinages. Il vient alors

$$C = \frac{1}{2} \frac{n \omega_1 \mathfrak{N}^2 R}{R^2 + \omega_1^2 L^2}$$

Remarquons d'ailleurs que le flux $\mathfrak{N}$, dans tous les cas, est dû, non seulement aux courants inducteurs, mais encore aux induits eux-mêmes.

Relation entre le couple et la vitesse de rotation. — La formule précédente nous montre immédiatement que, si $\omega_1 = 0$, c'est-à-dire si le moteur et l'alternateur marchent en synchronisme, $C = 0$; l'alternomoteur, dans ce cas, n'est capable d'aucun effet.

Si au contraire ω_1 devient considérable, la valeur du couple moteur devient encore petite. Entre ces deux valeurs extrêmes de la variable, nous allons trouver une grandeur qui rendra notre fonction maxima. Pour l'obtenir annulons la dérivée $\frac{dC}{d\omega_1}$; il vient

$$\frac{dC}{d\omega_1} = \frac{\frac{1}{2} n \mathfrak{N}^2 R (R^2 - \omega_1^2 L^2)}{(R^2 + \omega_1^2 L^2)^2}$$

Le second membre s'annule pour

$$\omega_1 = \frac{R}{L}$$

Cette valeur particulière du glissement est celle qui assure au couple moteur sa grandeur maxima. Si nous construisons la courbe

$$C = f(\omega_1)$$

nous obtenons le tracé (fig. 617); le maximum de C est Aa.

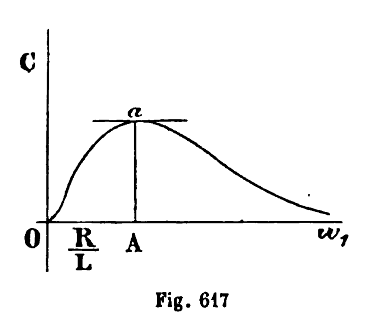


Fig. 617

Relation entre le couple et la résistance de l'induit. — L'expression de C nous montre encore que ce couple C s'annule pour deux valeurs de R :

1° Pour $R = 0$

2° Pour R très considérable.

Une valeur intermédiaire de R rendra notre fonction maxima. Annulons la dérivée $\frac{dC}{dR}$

$$\frac{\frac{1}{2}\, n\, \omega_1\, \mathfrak{N}^2 (\omega_1^2 L^2 - R^2)}{(R^2 + \omega_1 L^2)^2} = 0$$

d'où nous tirons

$$\omega_1^2 L^2 - R^2 = 0$$

c'est-à-dire

$$R = \omega_1 L$$

Telle est la valeur de la résistance de l'induit qui rend le couple maximum. On voit d'ailleurs que cette dérivée qui s'annule pour $R = \omega_1 L$, est positive pour les valeurs de R inférieures et négative pour R supérieure.

Or si nous considérons la valeur *très faible* que présente R relativement à L qui est *considérable*, nous voyons que pratiquement

$$R < \omega_1 L$$

Pour ce cas

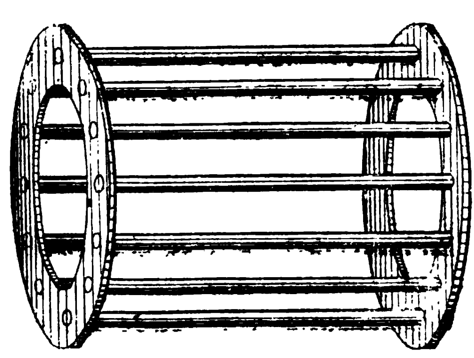
$$\frac{dC}{dR} > 0$$

et le couple C *augmente quand nous faisons croître la valeur de la résistance* R *de l'induit.*

Cette conséquence à laquelle nous sommes conduits trouve son application dans le fonctionnement de certains moteurs comme nous le verrons ci-après.

Induit en cage d'écureuil. — Nous avons supposé l'induit constitué par une série de spires rectangulaires disposées suivant des plans diamétraux du tambour. Chacune de ces spires est alors formée de quatre portions : deux suivant les génératrices

opposées du cylindre magnétique et deux autres diamétrales. Les premières seules sont les sièges de courants induits et si nous supposons qu'elles seules présentent à l'électricité une résistance appréciable, il nous est facile de comprendre que la chute de potentiel RI, d'après la loi d'Ohm, dans chacune de ces portions, compense exactement la tension due à l'induction. Dans ces conditions les deux extrémités de chaque fil périphérique se trouvent être au même potentiel. Dès lors si nous réunissons toutes les extrémités de ces fils situées sur une même face du tambour, il nous reste, sur l'autre face, toutes les extrémités opposées, également au même niveau électrique, que nous pouvons, sans aucun inconvénient connecter.


Fig. 618.

Cette disposition constitue le rotor en *cage d'écureuil*. Les divers fils peuvent être posés simplement à la surface externe du tambour magnétique; leurs extrémités sont reliées par deux bagues; ou bien encore on peut les loger dans des encoches pratiquées à la périphérie des tôles qui forment le noyau. Il est encore possible d'adopter la *disposition Brown* : passer les fils de cuivre dans des trous poinçonnés dans les tôles puis souder les extrémités à deux anneaux de cuivre sans résistance électrique appréciable.

Induits bobinés. — Les induits en cage d'écureuil ont une résistance faible mais *invariable*. Or nous avons vu qu'il est possible d'augmenter le couple moteur de la machine en faisant croître la résistance du rotor. Pour rendre facile l'application de cette propriété, on remplace assez souvent la disposition précédente par des bobinages analogues aux induits des alternateurs polyphasés. Dans le rotor en cage d'écureuil, s'il y a n circuits, nous avons un système comparable à l'induit d'un alternateur à n phases. La rotation se produit quel que soit ce nombre n et nous pouvons dès lors faire usage d'un bobinage à deux ou trois phases (ce nombre d'ailleurs n'étant pas lié forcément à celui des phases du courant inducteur).

L'avantage de ces *induits bobinés* est que l'on peut, par l'intermédiaire de bagues et de balais, réunir les enroulements à des rhéostats extérieurs. D'un autre côté ces moteurs n'ont plus la grande simplicité des premiers : absence de balais et de collecteur.

Fonctionnement du moteur. — Nous avons indiqué (fig. 617) la courbe qui représente la fonction

$$C = f(\omega_1)$$

C étant le couple moteur et ω_1 la vitesse relative de rotation de l'induit par rapport à la vitesse de rotation du champ.

Si nous portons (fig. 619) à partir de l'origine, une longueur Oo égale à ω vitesse de rotation du champ magnétique, nous voyons qu'à la vitesse relative $\omega_1 = OB$ correspond une vitesse angulaire ω' du rotor égale à oB, de sorte que la courbe cba, avec les axes de coordonnées oO et oC, représente

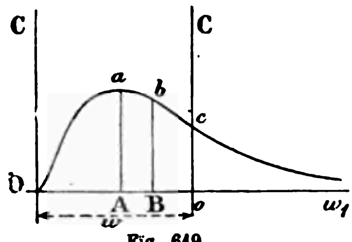


Fig. 619.

$$C = f(\omega')$$

relation entre le couple moteur et la vitesse, c'est-à-dire encore la *caractéristique mécanique* de l'alternomoteur à champ tournant.

Nous avons supposé $Oo = \omega$ supérieur à OA, valeur correspondant au maximum du couple. Cela suppose évidemment

$$\omega > \frac{R}{L}$$

En raison de la petitesse de R et de la grandeur considérable de L, cette condition est ordinairement remplie.

De l'examen de la courbe cba, nous tirons plusieurs conséquences :

1° Au démarrage ω' est nul et, par suite, la valeur du couple est alors oc, fraction plus ou moins considérable de la valeur maxima Aa. Comme nous l'avons vu déjà, nous augmentons ce couple au démarrage en ajoutant des résistances dans l'induit.

2° Quand le moteur prend une certaine vitesse, le couple augmente, suivant les ordonnées Bb, passe par un maximum Aa pour une vitesse de rotation oA, puis décroit si l'allure s'accélère.

On appelle encore *rendement du moteur* le rapport qui existe entre la puissance mesurée au frein sur l'arbre de ce moteur et celle que nous dépensons, sous la forme électrique, pour l'alimentation de l'appareil.

Les pertes d'énergie se composent, comme dans tous les autres cas semblables :

1° Dans les *inducteurs*, des effets Joule, des courants de Foucault et de l'hystérésis. On diminue ces deux derniers effets en choisissant avec soin le fer des noyaux et en employant des inductions faibles à une fréquence modérée.

2° Dans l'induit, courants de Foucault, réduits par la division de l'armature, hystérésis, variable avec le glissement, effet Joule.

L'expérience a montré que le rendement de ces moteurs atteint celui des bons moteurs à courant continu soit quelquefois 95 0/0.

Introduction de résistances dans l'induit. — 1° Quand le rotor est bobiné, l'introduction de résistances dans le circuit, en vue d'augmenter la valeur du couple, au démarrage notamment, ne présente aucune difficulté : supposons un induit à trois sections (fig. 620). Les trois entresections communiquent à trois bagues isolées montées sur l'arbre de rotation et ces anneaux sont reliés respectivement aux trois fils

d'un rhéostat triphasé. La valeur du couple moteur peut ainsi être réglée d'une façon assez étendue.

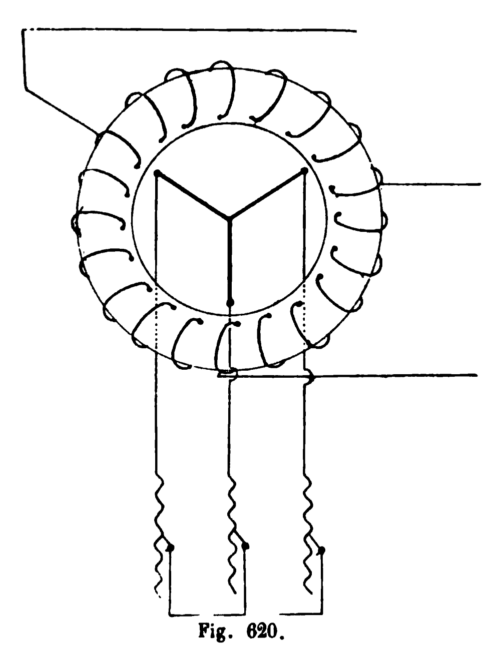


Fig. 620.

La figure 621 représente un moteur triphasé à induit bobiné et à trois bagues, construit par la *Société alsacienne* de Belfort, puissance 45 chevaux.

2° Quand l'induit est en cage d'écureuil, il faut des artifices spéciaux si l'on veut ajouter des résistances dans le circuit. Nous décrirons l'un d'eux, dû à M. Boucherot et employé par la maison Bréguet dans la construction du type α. Ce moteur, dont l'ensemble est représenté (fig. 622) comprend un *stator* partagé en deux parties montées sur un bâti commun; l'une est fixe, l'autre peut tourner autour de son axe, soit par un levier soit par un volant actionnant une vis de commande; des câbles souples relient les deux

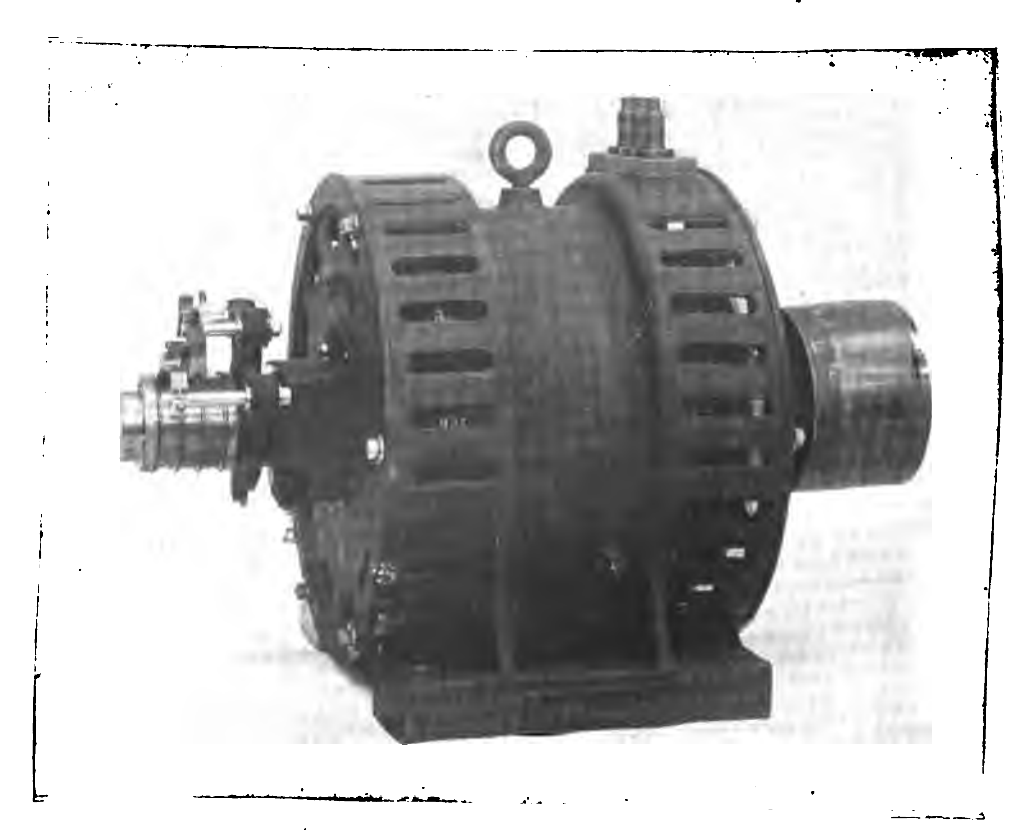
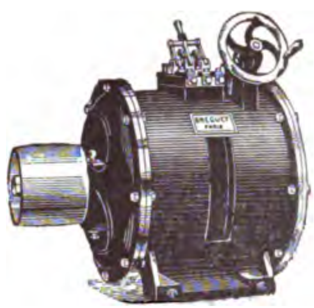


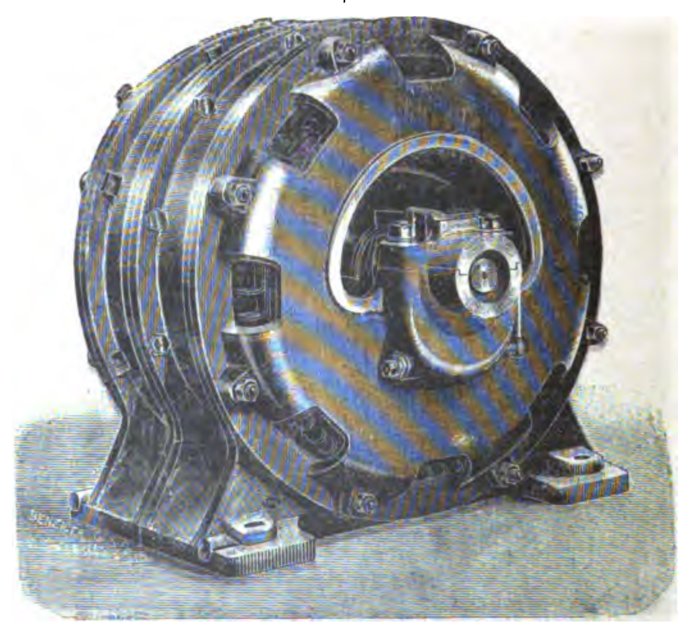
Fig. 621.


Fig. 622.

enroulements. Son *rotor* est une cage d'écureuil dont les barres de cuivre sont reliées toutes entre elles par leur milieu au moyen d'une frette assez résistante à l'électricité (ferro-nickel ou maillechort). Dans le cas où les deux stators sont semblablement placés l'un devant l'autre, les courants induits dans les deux moitiés d'une même tige de la cage sont concordants et s'ajoutent; la frette ne joue aucun rôle. Mais si nous décalons les deux parties inductrices de manière que la polarité de deux points en regard soit opposée, nous induisons des courants contraires dans les deux moitiés d'une même tige de cuivre et ces courants doivent se fermer sur eux-mêmes au moyen de la bague supplémentaire qui est résistante. Nous sommes donc arrivés au but poursuivi. C'est la position de démarrage. Dès que cette opération est faite, on supprime le décalage et la cage d'écureuil fonctionne à la façon ordinaire.

Dans ce moteur l'intensité prise à la canalisation est proportionnée à la valeur du couple de démarrage.

La disposition est très simple. On peut d'ailleurs combiner l'interrupteur de courant avec le levier ou le volant qui commande le déplacement. En effet soit ce levier dans sa position de repos; poussons-le jusqu'à la moitié de sa course : nous assurons le décalage et la fermeture du courant (*position de démarrage*); poussons-le ensuite à fond de course : le courant persiste et le déplacement angulaire des deux demi-stators est annulé (*marche*). Enfin le retour en arrière jusqu'à la position de repos coupe le courant.


Fig. 623.

Quelques types de moteurs asynchrones. — La figure 623 nous montre un

moteur *Brown Boveri et Cie*. Il peut présenter soit la disposition en cage d'écureuil soit celle de l'induit bobiné.

Dans le cas de puissances faibles, le démarrage se fait sans aucun artifice, mais dans les moteurs plus importants, il faut employer un *démarreur* spécial destiné à empêcher les perturbations qui se produiraient dans la ligne au moment de la mise en train. Nous savons déjà en quoi consiste l'emploi de résistances par bagues et balais. Si le moteur est à cage d'écureuil, on peut disposer le démarreur sur l'inducteur. Pour cela on emploie des bobines de self $b\,i$ sur chaque phase de la canalisation (fig. 624). Pour démarrer, on relie la phase du moteur M à deux points tels que g et i, choisis par tâtonnement comme convenant le mieux à la mise en marche du moteur chargé d'une façon donnée. Cette disposition n'est que transitoire; dès que le démarrage est effectué on supprime les bobines de self et la phase du moteur est mise directement sur celle de la ligne.

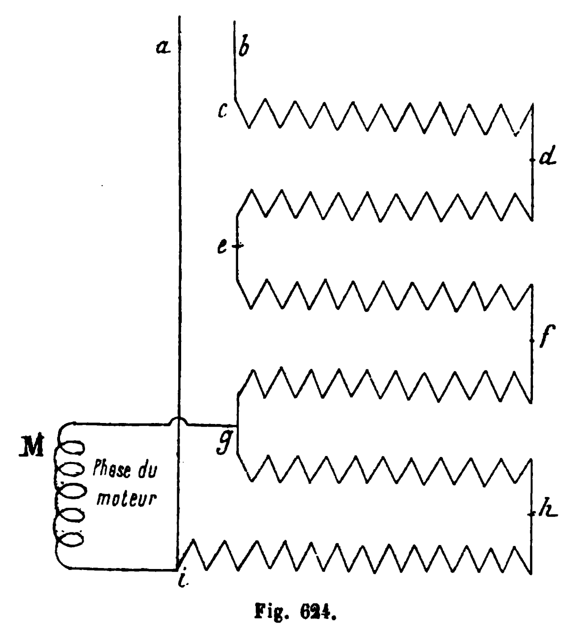
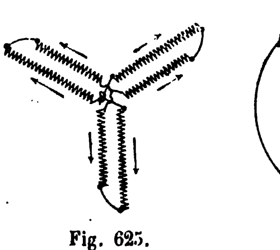
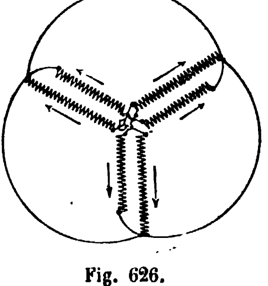


Fig. 624.

Nous avons reproduit (fig. 621) un moteur de la *Société alsacienne*. Ce moteur est à bagues, de façon à permettre l'introduction de résistances variables dans l'induit mais ordinairement, pour des puissances moyennes (jusqu'à 50 chevaux environ) et tant que le couple au démarrage n'excède pas les trois quarts du couple normal, on change de disposition et l'on fait usage d'un *coupleur* qui peut être *à main* ou *automatique*. Le rotor est alors bobiné de telle sorte que les forces électromotrices d'induction qui se produisent dans chacune des sections de l'enroulement soient de sens contraire (fig 625). Etant donné que les nombres de spires sont inégaux, nous avons une f. é. m. résultante qui assure le démarrage. Dès que la machine est en marche normale, le coupleur met simultanément toutes les sections en court-circuit comme le montre la figure 626. L'appareil *à main* consiste en un simple levier; le dispositif *automatique* est une sorte de régulateur à force centrifuge qui agit comme le levier, quand la vitesse a atteint une valeur déterminée.


Fig. 625.


Fig. 626.

Citons enfin quelques moteurs des *Ateliers d'Œrlikon;* pour de petites puissances

ils ne possèdent ni coupleur ni rhéostat de démarrage. La figure 627 représente un appareil destiné à actionner un métier à tisser.

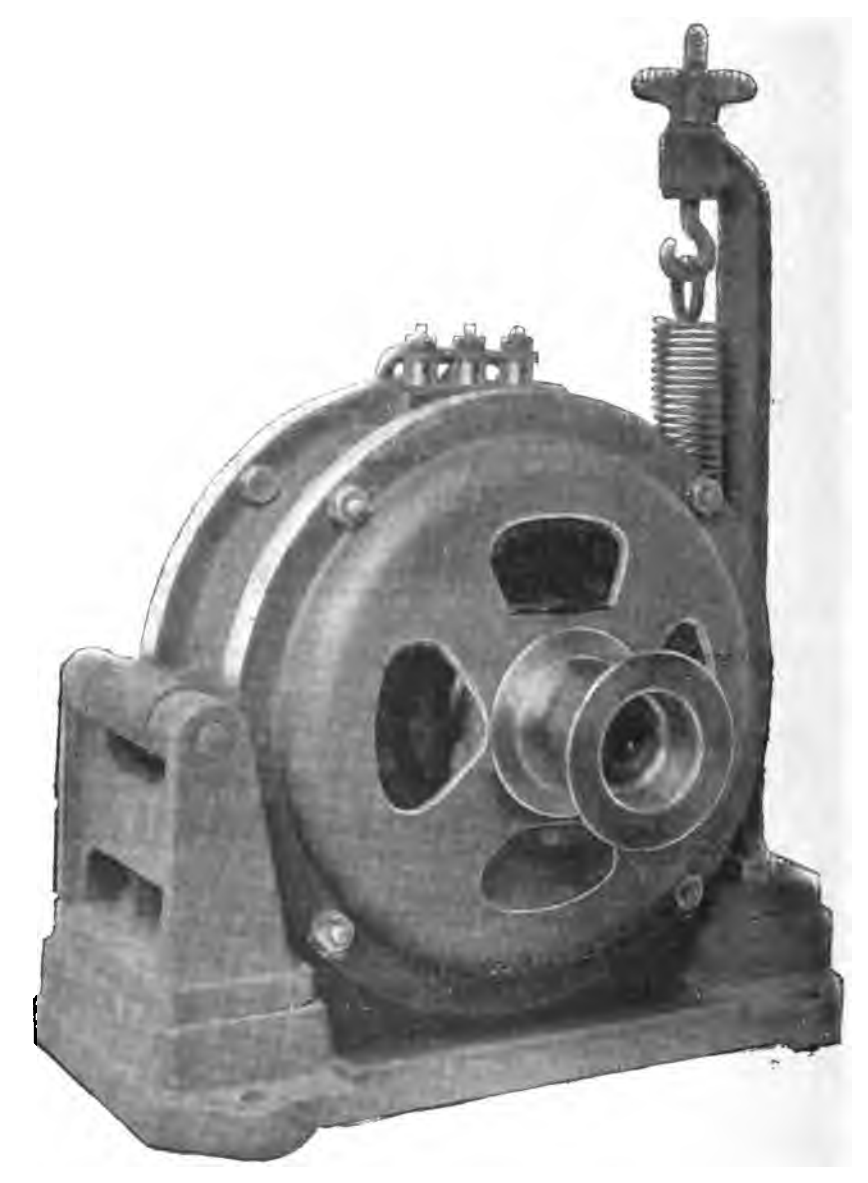


Fig. 627.

Les moteurs de puissances moyennes et considérables sont ordinairement munis de bagues et de rhéostat de démarrage. Jusqu'à 20 chevaux environ, l'appareil continue à fonctionner après démarrage, avec ses bagues et ses frotteurs ; mais, pour des unités plus importantes, on a généralement un levier destiné à soulever les balais, dès que la marche normale est obtenue et un autre qui sert à mettre les spires en court-circuit (fig. 628).

La même disposition est employée dans les moteurs destinés à fonctionner sous de

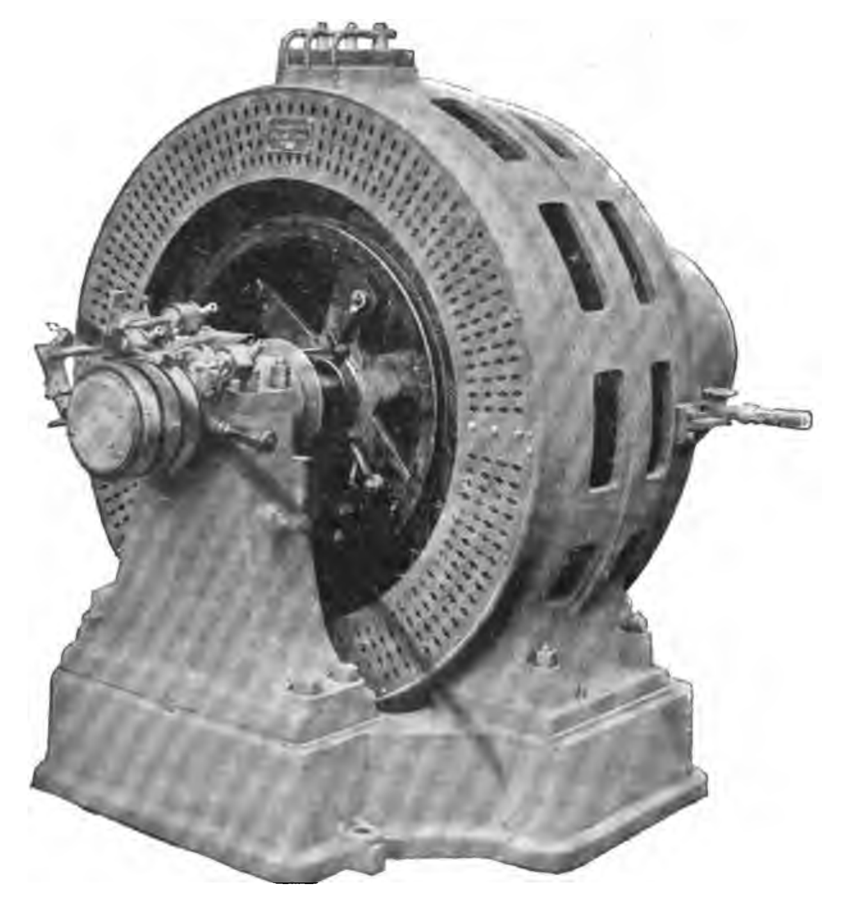


Fig. 628.

hautes tensions. Il est à remarquer d'ailleurs que ces manœuvres de mise en marche portent sur l'induit qui est toujours à basse tension.

CHAPITRE VI

MOTEURS ASYNCHRONES MONOPHASÉS

Principe. — Nous savons déjà en quoi consistent ces moteurs: l'inducteur, ordinairement fixe *le stator*, est alimenté de courants alternatifs simples. Le *rotor* est alors ou une cage d'écureuil ou un système bobiné; sa rotation est due à l'action des inducteurs sur les induits développés dans cette pièce mobile.

En raison de cette disposition, les appareils de cette classe peuvent être nommés *asynchrones à champ alternatif.*

Il est facile de passer des moteurs à champ tournant à ceux qui nous occupent actuellement. Pour cela faisons d'abord la remarque suivante :

Un champ alternatif F *de direction xx' peut être remplacé par deux champs constants de grandeur* $\frac{F}{2}$ *et tournant, avec une vitesse* ω *égale à la pulsation du courant alternatif, dans deux sens opposés.*

En effet au temps zéro les deux composantes $\frac{F}{2}$ dirigées suivant Ox s'ajoutent et donnent F; après un quart de période, les deux forces $\frac{F}{2}$ sont en opposition, résultante nulle; après une demi-période, addition des deux composantes suivant Ox' et ainsi de suite.

Nous allons en déduire le fonctionnement du moteur asynchrone monophasé.

Fig. 629.

Fonctionnement du moteur asynchrone monophasé. — 1° Soit d'abord l'induit au repos; il est sollicité, à un même instant, par les deux champs tournants égaux et contraires dont les actions s'annulent : le moteur ne peut pas tourner. Donc *ces moteurs ne démarrent jamais spontanément même à vide.*

2° Supposons maintenant que nous lancions le moteur, par un moyen quelconque,

dans un sens donné, 1 par exemple (fig. 629) avec une vitesse angulaire ω'. Ce sens est conforme à celui du champ marqué 2 et contraire du sens 3; il s'ensuit que le *glissement* du champ 2 sur l'induit est

$$\omega - \omega'$$

et celui du champ 3 sur le même induit

$$\omega + \omega'$$

Or la figure 617 nous a indiqué comment varie le couple moteur avec ce glissement que nous avons désigné par ω_1. Si nous représentons (fig. 630) par OA la valeur de la pulsation, nous aurons, pour trouver les valeurs des couples (contraires) qui correspondent aux deux champs tournants 2 et 3, à porter ω' suivant AC et suivant AB. Les ordonnées respectives C*c* et B*b* nous donnent les couples moteurs 2 et 3; le premier est concordant avec le lancé du moteur; le second est antagoniste et nous voyons que, dans les conditions supposées sur la figure, le premier dépasse le second et continue le mouvement initial.

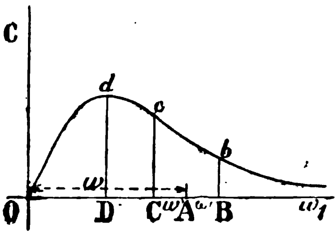


Fig. 630.

La condition indispensable est donc que ω dépasse OD, abscisse qui correspond au couple maximum. Nous avons vu qu'ordinairement cette condition est remplie grâce à la petitesse de la résistance du circuit induit.

La fig. 631 représente schématiquement un moteur de cette catégorie; les deux enroulements inverses que l'on voit sur l'armature externe établissent en A et en B deux pôles qui sont inverses à un moment donné. Le rotor est encore formé de barres de cuivre reliées en court-circuit.

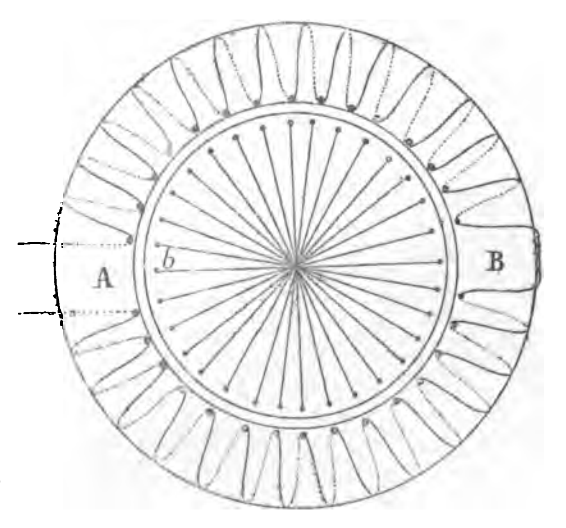


Fig. 631.

La vitesse de ces moteurs n'est pas réglée uniquement par la pulsation ω (il n'y a pas *synchronisme*) mais elle est liée à la charge.

Leur élasticité est donc plus grande que celle des moteurs synchrones. Cependant sous l'action d'une surcharge trop forte, il y a *décrochage*.

Démarrage des moteurs asynchrones monophasés. — Nous avons vu qu'il n'est jamais spontané, même à vide; il faut donc faire usage de *démarreurs*. Ceux

qu'on emploie presque exclusivement consistent à transformer le moteur monophasé en un moteur à plusieurs phases au moment du démarrage. Pour cela il y a, sur l'armature inductrice, deux enroulements, le bobinage ordinaire et un autre décalé sur le premier. Au moment de la mise en marche, on envoie, dans cet enroulement supplémentaire, un courant convenablement décalé sur le principal et le moteur est alors *à champ tournant*. Il s'agit donc d'obtenir ce décalage : on y parvient soit au moyen d'une *bobine de self* (provoquant un *retard* de phase) soit par un *condensateur* (amenant une *avance*). Généralement c'est le premier moyen qui est utilisé : le *démarreur* consiste alors essentiellement en un commutateur spécial portant d'une part deux bornes reliées à la ligne alternative et de l'autre trois connexions pour le moteur (deux pour l'enroulement principal, la troisième pour le bobinage supplémentaire).

La poignée du commutateur étant placée dans une position déterminée, le courant est coupé (position de repos). Si nous amenons le contact dans une seconde situation (position de démarrage) nous fermons le circuit principal, en même temps que nous constituons un circuit supplémentaire à travers une bobine de self logée ordinairement au-dessous de l'interrupteur. Enfin dès que la marche normale est atteinte, nous poussons le levier dans la dernière position possible, ce qui a pour effet de supprimer l'enroulement supplémentaire. Dans ces conditions, on pourrait à la rigueur démarrer sous charge mais on préfère ordinairement opérer à vide et établir ensuite la charge soit par le passage d'une courroie de la poulie folle à la poulie fixe soit par un embrayage à friction.

On peut rapprocher des moteurs monophasés les *moteurs monocycliques*, lesquels comportent un enroulement supplémentaire relié par une de ses extrémités à une borne du récepteur et de l'autre à une borne accessoire que l'on réunit au fil de démarrage de la ligne monocyclique.

CHAPITRE VII

COMPARAISON DES DIVERS MOTEURS

Nous avons en présence les moteurs :

1° Continus ;

2° Alternatifs monophasés ;

3° Polyphasés.

Nous comparerons d'abord ceux des deux dernières catégories, c'est-à-dire les moteurs alternatifs à une ou à plusieurs phases.

Moteurs monophasés et polyphasés. — Considérons seulement les systèmes asynchrones ; ce sont les plus employés :

1° Le démarrage est facile dans le cas du courant à plusieurs phases ; il faut au contraire des artifices pour obtenir la mise en marche d'un moteur monophasé.

2° Les moteurs polyphasés peuvent être fortement surchargés. Ils supportent momentanément 100 0/0 et davantage de surcharge. Un appareil alternatif simple ne pourrait tourner à un tel régime ; sa charge nominale amène quelquefois le décrochage si elle s'applique brusquement ;

3° On arrive à régler la vitesse d'un moteur à champ tournant au moyen de résistances dans l'induit ;

4° La considération du rendement est encore en faveur des courants polyphasés. Le facteur de puissance est surtout beaucoup plus considérable pour eux que pour les courants à une seule phase.

On voit donc que tous les avantages sont pour les moteurs polyphasés, c'est-à-dire à champ tournant.

Les appareils monophasés sont moins employés. Leur application se trouve indiquée quand on désire installer quelques moteurs sur une distribution destinée à la lumière surtout et alimentée par courants alternatifs simples.

Il reste maintenant en présence, pour la comparaison, les moteurs polyphasés d'une part, les moteurs continus de l'autre.

Moteurs continus et polyphasés. — 1° Les premiers excluent forcément les transformateurs et ne permettent pas de profiter des avantages économiques de ces appareils.

Par contre, les moteurs polyphasés ne marchent pas par accumulateurs ;

2° L'installation d'une distribution triphasée est moins coûteuse que celle d'une distribution par courant continu, si on considère les appareils producteurs et récepteurs du courant ;

3° La dépense d'entretien d'un moteur polyphasé sans collecteur est très faible; comme soin, une charge d'huile de temps en temps suffit. Un moteur continu avec son collecteur demande une certaine surveillance, ce qui n'empêche pas le collecteur d'être mis rapidement hors d'usage si le moteur est soumis à des variations brusques de courant;

4° Un moteur continu, demande un rhéostat de démarrage. Le moteur triphasé jusqu'à une vingtaine de chevaux peut se passer d'aucun appareil semblable ;

5° Les machines réceptrices de courants polyphasés s'accommodent beaucoup mieux d'un renversement brutal de courant que les moteurs continus; elles peuvent marcher sous des voltages considérables.

6° Enfin, d'après M. P. Boucherot, le rendement des moteurs polyphasés pourrait dépasser de 2 à 3 0/0 celui des moteurs à courant continu.

L'avantage reste donc aux courants polyphasés. A peu près toutes les fois que l'installation électrique doit comporter uniquement des moteurs, on adopte ces courants. Si l'on veut faire de la lumière et de la force, on prend tantôt un système et tantôt l'autre. Il nous reste maintenant en parallèle les courants à deux ou à trois phases.

Moteurs diphasés et triphasés. — En général, on donne la préférence, quand il s'agit seulement de transmission d'énergie, aux courants triphasés. Pour des usages mixtes : éclairage et force, on adopte les courants diphasés.

Les premiers nécessitent un poids de cuivre moins grand que les seconds pour l'installation des conducteurs; les derniers se prêtent mieux à l'éclairage.

CHAPITRE VIII

TRANSPORT DE L'ENERGIE PAR L'ÉLECTRICITÉ

Objet de la transmission. — On possède en un point une certaine quantité d'énergie ; il s'agit de la transporter à distance par l'intermédiaire d'un courant électrique.

Les sources naturelles sont nombreuses : elles sont constituées le plus souvent par des chutes d'eau.

On a bien pensé également à utiliser sur place, dans les mines, l'énergie chimique du combustible et à transporter à distance, sous la forme électrique, l'énergie naturelle ainsi transformée ; mais ce moyen n'a pas encore reçu d'application pratique.

Soit P la puissance disponible au départ et mesurée sur l'axe de la turbine ; nous l'utilisons à entraîner une génératrice que nous allons supposer à courant continu, pour la facilité du calcul. (Dans le cas de courants alternatifs, il faudrait tenir compte du facteur de puissance).

La dynamo nous donne I ampères sous E volts, soit une puissance

$$E \times I$$

Cette puissance confiée au courant est consommée en deux parts : l'une échauffe les fils, soit $R I^2$, si on appelle R la résistance totale présentée à l'électricité par les conducteurs (machines comprises) ; l'autre partie P' est fournie à un électromoteur placé sur la ligne

$$EI = RI^2 + P'$$

d'où l'on tire

$$P' = EI - RI^2 \quad (1)$$

Le premier terme EI de l'expression est constant ; on aura donc le maximum de travail transmis pour la plus petite valeur possible du terme soustractif, perte calorifique. Pour diminuer $R I^2$, il faut :

1° Ou faire décroître R, ce qui revient à augmenter la section des conducteurs, et cela n'est pas toujours pratique au point de vue économique;

2° Ou prendre pour intensité I une très petite valeur, avec une grandeur de E correspondante, puisque $E \times I =$ constante.

Nous sommes ainsi amenés à cette conclusion, que nous devions prévoir: *opérer la transmission sous tension élevée.* Cette haute tension peut d'ailleurs être limitée par la difficulté d'isoler convenablement les machines et la ligne. Pour les machines en particulier, on ne dépasse guère 4.000 volts en courant continu mais on peut coupler plusieurs dynamos en série. Dans tous les cas, il est nécessaire de former le collecteur d'un grand nombre de lames et de préférer les induits annulaires aux tambours.

Rendement électrique de la transmission. — On appelle *rendement électrique de la transmission* le rapport de la puissance électrique recueillie par le moteur à la puissance engendrée par la génératrice.

Avec les notations adoptées au paragraphe précédent, ce quotient est représenté par

$$R_{élect.} = \frac{P'}{EI}$$

Si e est la force contre-électromotrice du moteur nous avons

$$P' = e\,I$$

Et alors le rendement électrique prend cette nouvelle expression

$$(2) \qquad R_{élect.} = \frac{P'}{E\,I} = \frac{e\,I}{E\,I} = \frac{e}{E}$$

Ce rendement a une valeur qui est utile au point de vue théorique surtout. Nous aurons plus loin à en considérer un autre plus important.

Variations du rendement électrique et de la puissance transportée. — Il est intéressant de relier le rendement électrique à la puissance transmise au moteur. Nous tirons de l'expression (1).

$$E\,I = P' + R\,I^2 = e\,I + R\,I^2$$

Divisons les deux membres par I, quantité différente de zéro; il vient

$$E = e + R\,I$$

d'où

$$e = E - R\,I$$

Le rendement électrique devient donc

$$\frac{e}{E} = \frac{E - I\,R}{E} = 1 - \frac{I\,R}{E}$$

Remarquons que I seulement varie dans cette expression ; si le moteur est au repos, cette intensité prend sa valeur maxima, donnée par la loi d'Ohm

$$I = \frac{E}{R}$$

et alors le produit : $\frac{IR}{E}$ devient l'unité, le rendement est nul ; toute l'énergie prise à la génératrice est dissipée sous la forme calorifique. Si le moteur est en mouvement, il engendre une certaine force contre-électromotrice (l'intensité diminue en proportion) et le rendement électrique augmente de plus en plus. Grâce à l'augmentation de vitesse, la force contre-électromotrice peut atteindre E (alors l'intensité s'est annulée dans la ligne) et le rendement devient l'unité : le moteur ne travaille pas mais la transmission ne demande aucune énergie à la génératrice.

Donc si nous n'envisageons que le rendement électrique, nous le voyons augmenter de 0 à 1 à mesure que nous laissons croître la vitesse du moteur.

Quant à l'énergie transportée, elle ne varie pas du tout de la même manière : en effet le moteur *ne travaille pas* dans deux cas différents :

1° S'il est au repos, rendement nul ;

2° S'il tourne à une vitesse exagérée sans produire d'énergie en n'absorbant théoriquement aucun travail à la génératrice (rendement unité).

Dans l'intervalle, nous allons trouver une valeur maxima de la puissance transmise. Exprimons cette puissance : nous avons

$$I = \frac{E - e}{R}$$

donc

$$P' = e\,I = \frac{e\,(E - e)}{R}$$

Cette puissance n'est fonction que de la variable e. On voit aisément que le maximum de P' a lieu pour une valeur de e telle que

$$e = E - e$$

d'où

$$e = \frac{E}{2}$$

Alors le rendement a la valeur $\frac{1}{2}$. C'est la disposition qui transmet la plus grande somme de travail, mais c'est aussi celle qui demande le plus d'énergie à la génératrice. Ce rendement de 50 0/0, qui suppose la moitié de la puissance perdue en chaleur, est peu avantageux ; il est préférable de faire moins travailler le moteur mais à un rendement supérieur.

Rendement industriel de la transmission. — Dans la pratique le problème se pose de la manière suivante :

Déterminer *la fraction de la puissance* P *qui est disponible sur l'arbre du moteur.* Ce rapport est le *rendement industriel* de la transmission.

Soit p la puissance recueillie, mesurée au frein sur l'arbre du moteur récepteur.

Nous avons par définition

$$(3) \qquad R_{ind.} = \frac{p}{P}$$

Nous remarquons que p diffère de e I ou P', travail absorbé par le moteur. Entre ces deux nombres p et e I, nous avons un rapport égal au *rendement industriel de la réceptrice* soit $R_{récept.}$

$$(4) \qquad R_{récept.} = \frac{p}{e\,I}$$

De même E I puissance électrique de la génératrice est moindre que P et l'on a

$$(5) \qquad R_{gén.} = \frac{E\,I}{P}$$

en désignant par $R_{gén.}$ le *rendement industriel de la dynamo.*

Enfin nous savons que le *rendement de la ligne ou rendement électrique de la transmission* s'exprime par

$$(6) \qquad R_{élect.} = \frac{e}{E}$$

Multiplions membre à membre les trois expressions (4) (5) et (6) ; nous aurons

$$R_{récept.} \times R_{gén.} \times R_{élect.} = \frac{p}{e\,I} \times \frac{E\,I}{P} \times \frac{e}{E} = \frac{p}{P}$$

Le second membre est l'expression du *rendement industriel de la transmission*, de sorte que nous pouvons écrire identiquement

$$R_{ind.} = R_{élect.} \times R_{gén.} \times R_{récep.}$$

Ce rendement utile est donc le produit de trois fractions. Sa valeur est forcément inférieure à celle des divers autres rendements, ce qui se conçoit puisque chaque organe absorbe une partie de l'énergie disponible.

Nous avons vu que le maximum du rendement d'une dynamo peut être fixé à 0,94. Prenons la même valeur pour le rendement de la réceptrice et enfin admettons que nous consacrions 10 0/0 de l'énergie confiée à la ligne pour la perte en chaleur. Nous voyons que le rendement industriel de la transmission a pour valeur maxima :

$$0{,}94 \times 0{,}94 \times 0{,}90 = 79{,}5$$

et cela pour le cas de fortes puissances. On pourrait bien diminuer encore un peu la perte dans la ligne en adoptant des conducteurs à plus forte section, mais alors les frais d'établissement se trouvent augmentés. Lord Kelvin a établi que la meilleure condition économique de fonctionnement est celle pour laquelle la perte annuelle par effet Joule dans la ligne égale la somme de l'amortissement et de l'intérêt du capital engagé dans la ligne.

Le transport électrique de l'énergie se fait soit par courant continu soit par courants polyphasés et plus spécialement triphasés.

Transmission par courant continu. — La première démonstration pratique a été faite à Vienne, en 1873.

En 1882, M. Marcel Deprez a commencé des essais nombreux de transmissions importantes : à Munich, dans les ateliers du chemin de fer du Nord, à Grenoble, entre Creil et La Chapelle-Paris. etc. Les plus célèbres expériences ont été réalisées en 1885-86 entre les gares de Creil et de La Chapelle : à Creil, station génératrice, était installée une première dynamo de construction spéciale donnant 6.000 volts, mue par une locomobile de 150 chevaux. A la Chapelle trois dynamos réceptrices avaient été projetées pour l'éclairage, la manutention hydraulique et les machines-outils des ateliers de la Compagnie du Nord. Une seule machine fonctionna réellement ; elle fournit, dans l'un des essais, un travail de 52 chevaux alors que la génératrice en prenait 116 au moteur. Le rendement industriel avait donc la valeur

$$\frac{52}{116} = 0,448 \text{ ou } 44,8\ \%$$

Distance des deux postes : 56 kilomètres. Ce rendement est relativement assez élevé mais au point de vue économique l'essai n'est pas concluant, étant donné le prix excessif d'une telle installation, à cause surtout des dynamos à très haut voltage que l'on a adoptées.

M. H. Fontaine a répété ces essais en remplaçant la ligne par une résistance artificielle équivalente, soit de 100 ohms environ, et en groupant en série quatre dynamos Gramme de construction ordinaire capables de développer le courant sous 1.500 volts seulement. Il avait ainsi 6.000 volts comme différence de potentiel et il envoyait le courant dans trois réceptrices semblables aux génératrices. Le travail mesuré sur l'arbre de commande des génératrices était, dans une expérience, de 96 chevaux ; on recueillait 50 chevaux sur l'arbre des réceptrices, d'où un rendement industriel de

$$\frac{50}{96} = 0,52 \text{ soit } 52\ \%$$

L'économie du système réside surtout dans la substitution aux dynamos de haut voltage d'une série de machines de construction courante accouplées en tension



Ces expériences ont été presque immédiatement suivies d'installations vraiment pratiques. L'une des plus anciennes est celle de M. Brown entre Soleure et Kriegstetten. Nous reviendrons plus loin sur les détails de cette installation que nous prendrons comme exemple, étant données les mesures certaines qui ont été effectuées sur elle.

En général lorsqu'il s'agit de transport d'énergie sous hautes tensions, ce qui est toujours le cas, on ne fait pas usage de machines en dérivation; on adopte ou l'excitation-série ou l'excitation indépendante.

Les moteurs en série ont l'avantage, dans les circonstances qui nous occupent, de pouvoir tourner à une vitesse parfaitement réglée quel que soit le débit de la génératrice. Il suffit, pour s'en convaincre, de considérer les caractéristiques AB et A' B' des deux machines (fig. 632). Entre deux points C et C' de ces courbes correspondant à un

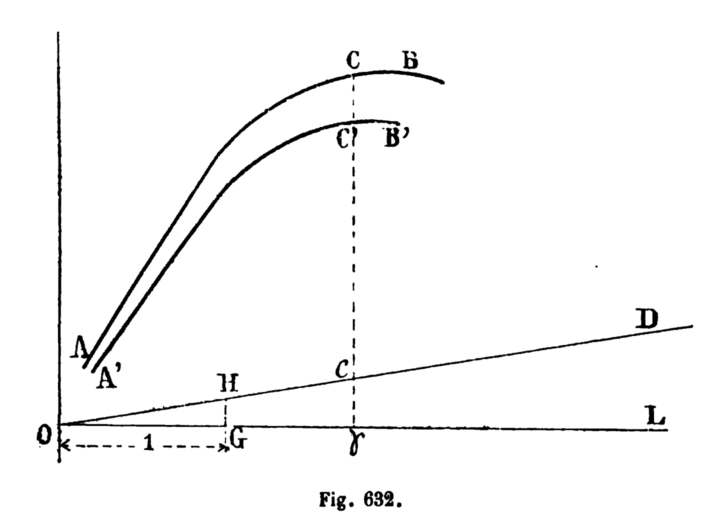


Fig. 632.

même débit, nous trouvons une différence d'ordonnées CC', et cette différence est d'autant plus réduite que nous diminuons davantage ce débit.

Portons cette longueur CC' en $c\gamma$ et joignons les points O et c; nous obtenons la droite OD qui représente la chute de tension dans la ligne en fonction de l'intensité si l'ordonnée HG, correspondant à l'abscisse OG unité, a pour valeur la résistance de cette ligne. Les diverses ordonnées de cette droite OD peuvent avoir pour valeurs les différences respectives des ordonnées des deux courbes AB et A' B' et, dans ces conditions, quelle que soit la marche de la génératrice, la tension reçue aux bornes du moteur est toujours l'ordonnée de la courbe A' B', la vitesse de la réceptrice reste rigoureusement celle qui correspond au tracé de la caractéristique.

Quelquefois, dans le but d'éviter l'emploi de la haute tension dans les bobines d'électro, on fait usage de l'excitation séparée. Au poste générateur, on entraîne une machine excitatrice par le même moteur mécanique que la dynamo principale. A l'arrivée, l'alimentation des inducteurs du moteur électrique est une difficulté. Ordinaire-

ment l'excitatrice est reliée mécaniquement au moteur et entraînée par ce dernier pendant la marche normale, mais au démarrage il faut user d'artifices :

1° Faire usage d'une batterie d'accumulateurs chargée au moyen de l'excitatrice pendant la marche. Le démarrage effectué, on ferme le circuit de la petite dynamo sur les électros du moteur et le système devient auto-excitateur.

2° *(Marcel Deprez)*. Le courant de la ligne est envoyé dans l'induit et dans les inducteurs du moteur pour le démarrage pendant que le circuit de l'excitatrice est fermé sur une résistance égale à celle des inducteurs. Dès que la marche normale est atteinte, on substitue, par le jeu d'un commutateur, les bobines inductrices à la résistance et l'alimentation de ces électros continue.

Exemple de transmission par courant continu. — Prenons la petite installation faite par M. Brown à Soleure (Suisse). La chute a une puissance variant de 30 à 50 chevaux. Elle actionne une turbine qui entraîne elle-même deux dynamos Brown accouplées en série afin de faire le transport au plus fort potentiel possible.

Dans l'une des expériences, on a mesuré au frein sur l'arbre de la turbine une puissance de

$$30,85 \text{ chevaux, soit } 30,85 \times 736 = 22.705 \text{ watts.}$$

Les dynamos génératrices réunies avaient une force électromotrice de 1836, 5 volts et présentaient, entre leurs bornes, une différence de potentiel de

$$1.753,3 \text{ volts.}$$

Leur débit avait pour valeur

$$11,47 \text{ ampères.}$$

La puissance confiée à la ligne était donc

$$1.753,3 \times 11,47 = 20.111 \text{ watts.}$$

D'où, pour le rendement industriel des dynamos

$$(1) \qquad \frac{20.111}{22.705} = 0,885, \text{ soit } 88,5\ \%$$

Le courant, engendré au premier poste, va à la seconde station, distante de 8 kilomètres, par trois fils de cuivre de 6 millimètres de diamètre. Deux seulement servaient dans les expériences ; leur résistance est de 9 ohms environ. Pour donner à la canalisation un isolement suffisant, les 180 poteaux qui supportent les fils sont munis d'isolateurs à liquide.

Le courant mesuré à l'arrivée est de

$$11,42 \text{ ampères}$$



le voltage, entre les bornes de la réceptrice

$$1.655,9 \text{ volts.}$$

La puissance absorbée par cette machine est

$$11,42 \times 1.655,9 = 18,910 \text{ watts}$$

Rendement de la ligne

$$(2) \qquad \frac{18.910}{20.111} = 0,94, \text{ soit } 94\ \%$$

Enfin la puissance mesurée au frein sur l'arbre récepteur est de

$$23,21 \text{ chevaux}$$

ou

$$23,21 \times 736 = 17.082 \text{ watts.}$$

Rendement industriel de la réceptrice

$$(3) \qquad \frac{17.082}{18.910} = 0,903 \text{ soit } 90,3\ \%$$

Enfin le rendement le plus utile à connaître au point de vue économique, c'est-à-dire le rendement industriel de la transmission, s'exprime par le quotient du travail recueilli 23,21 chevaux et du travail dépensé 30,85 soit

$$\frac{23,21}{30,85} = 0,752 \text{ ou } 75,2\ \%$$

Ce rendement est d'ailleurs le produit des trois rendements calculés en (1) (2) et (3).

Transmission par courants alternatifs. — L'économie résultant de l'emploi de ces courants est due aux transformateurs qui permettent d'atteindre sur la ligne des tensions très élevées.

Dans l'état actuel de la question des moteurs alternatifs, on est forcé d'avoir recours aux courants polyphasés. Ces courants sont produits par de très grosses unités à rendement élevé : les génératrices de 1.000 chevaux sont nombreuses ; celles des chutes du Niagara sont de 5.000 chevaux et on en fait de 10.000. A peu près toutes les installations utilisent les courants à trois phases ; les usines du Niagara cependant ont adopté les diphasés pour les machines déjà construites.

La disposition de ces alternateurs n'offre rien de très particulier ; le plus ordinairement quand l'énergie est prise à une chute d'eau, l'arbre de l'alternateur fait corps avec celui de la turbine ou de la roue.

Les courants produits sous très haute tension gagnent la ligne et viennent se trans-

former ordinairement au second poste avant d'alimenter le récepteur. Cependant certains moteurs à champ tournant sont construits pour fonctionner à haut voltage et, dans ce cas, le transformateur devient inutile. Nous avons vu les dispositifs employés pour le démarrage des moteurs à champ tournant.

Exemple de transmission par courants triphasés. — Nous prendrons l'installation faite en 1891 entre Lauffen et Francfort. C'est la première de ce genre.

Il s'agissait d'utiliser une chute d'eau ; la puissance mesurée sur l'axe de la turbine a varié de 78 à 195 chevaux. L'alternateur mis en mouvement engendrait une puissance variant, dans les mêmes conditions, de 66 à 185 chevaux, soit dans ce dernier cas 1400 ampères sous 50 à 56 volts sur chaque pont ; enfin on trouvait le rendement de l'alternateur compris entre

93,3 et 84,5 %

Un transformateur au départ élevait la tension dans le rapport de 1 à 160 avec un rendement de 95 à 96 %.

C'était alors sous un voltage de plus de 15.000 qu'avait lieu le transport dans des fils de 300 ohms de résistance n'absorbant qu'une faible partie de la puissance totale.

A Francfort, distant du point de départ de 175 kilomètres environ, les courants subissaient une réduction de voltage convenable et on recueillait une fraction de l'énergie de la génératrice comprise entre 77,8 à 83 %. Cette énergie comparée à celle que l'on mesurait sur la turbine donne un rendement industriel de la transmission compris entre

68,5 et 75,2 %



CHAPITRE IX

DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE PAR L'ÉLECTRICITÉ
APPLICATIONS

Le problème de la distribution de l'électricité a été étudié d'une façon générale. Il nous reste maintenant à parler du choix du moteur et à indiquer à quelles applications se prête l'énergie sous cette forme électrique.

Choix du courant. — Suivant les cas, on peut faire choix des diverses formes de courants. Quant il s'agit d'une distribution peu étendue, on adopte le continu à moins que les moteurs fonctionnant par ce courant ne présentent des inconvénients particuliers dans les emplois prévus.

Ce choix fait, on aura encore à fixer le genre de moteur: en série, en dérivation ou à excitation composée. Les premiers sont robustes et présentent au démarrage un couple énergique souvent très utile.

Les moteurs en shunt sont mieux réglés comme vitesse.

Suivant les cas, il convient donc d'adopter les uns ou les autres.

Lorsqu'il s'agit de petits moteurs, la vitesse de rotation est souvent trop considérable pour les applications et il faut, par des engrenages ou des transmissions, réduire cette vitesse à la valeur voulue.

Dans le cas indiqué de distribution peu étendue, les appareils récepteurs peuvent être groupés en quantité, mais on fait usage économiquement de distribution en série quand il s'agit de zones étendues. Chaque moteur doit alors être muni d'un appareil qui le met en court-circuit dès que la tension entre ses bornes dépasse une certaine limite (*by-pass automatique*, dont l'électro commandant la mise en court-circuit est alimenté par une dérivation prise sur les bornes du moteur.)

Le plus souvent chaque machine n'a pas son moteur électrique mais on groupe un certain nombre d'organes que l'on entraîne au moyen d'une transmission recevant elle-même son mouvement du récepteur électrique. Alors la vitesse, variable pour chaque machine, peut être modifiée par des poulies de diamètres appropriés.

Toutes les fois que la région à desservir électriquement est assez étendue, on emploie les courants alternatifs et surtout les courants polyphasés. On a alors la ressource de maintenir, entre les divers fils de la ligne, une tension très élevée que l'on peut d'ailleurs réduire à chaque moteur. En vertu de leurs propriétés spéciales, les moteurs à champ tournant s'imposent encore même quand la ligne n'est pas de grande étendue. Ces récepteurs sont fort simples et ils ne demandent pas d'entretien; on peut alors se permettre l'idéal de la distribution de l'énergie: c'est-à-dire un moteur par outil. Cette combinaison est une des meilleures que l'on ait imaginées: on supprime en effet toute transmission intermédiaire avec ses pertes inévitables et les charpentes se trouvent de ce fait allégées; l'énergie peut être envoyée dans tous les points de l'usine peu accessibles aux arbres de transmission; enfin les machines-outils, au lieu d'être fixes, peuvent se mouvoir, chacune avec son moteur propre jusqu'au point d'utilisation à une distance variable de la génératrice; il suffit de lier la machine mobile, par deux trolleys (1), à une canalisation aérienne comprenant deux fils nus et desservant toute l'usine. Ou bien encore on peut ménager de distance en distance des prises de courant sur lesquelles on branche, au moment voulu, le récepteur électrique qui actionne l'outil.

Les moteurs de petite puissance peuvent être placés de manières très diverses; on les fixe au mur par une console, ou bien au plafond surtout quand il s'agit d'actionner par le haut un outil isolé ou d'attaquer une transmission destinée à plusieurs machines.

D'autres moteurs se placent directement sur les appareils à entraîner; enfin les récepteurs puissants demandent ordinairement un socle en maçonnerie.

Quant à la transmission aux outils de la rotation du moteur, elle s'effectue par des moyens variés qui peuvent être ramenés à :

1° L'accouplement direct;

2° la transmission par courroies;

3° la transmission par engrenages, cônes de friction, vis sans fin.

L'accouplement direct n'est applicable que si la machine à entraîner s'accommode de la vitesse considérable du moteur. Exemples: essoreuses, ventilateurs, pompes centrifuges.

La transmission par courroies est une des plus employées; c'est en effet un lien élastique qui préserve les moteurs des chocs et des trépidations de la machine-outil. Dans ce cas il est nécessaire, pour éviter les glissements et l'usure rapide, de maintenir la tension de la courroie; c'est ce que l'on obtient au moyen des glissières. Dans ces conditions il importe de ne pas employer de courroie verticale; cet organe doit être aussi peu incliné que possible sur l'horizontale pour diminuer d'une part la tension nécessaire et d'autre part le déplacement du moteur pour compenser l'allongement. Le brin tirant doit d'ailleurs être au-dessous de façon à augmenter l'adhérence de la courroie sur la poulie.

1. Voir traction électrique.

La transmission par engrenages, cônes de friction, vis sans fin, s'applique enfin dans tous les cas où la courroie est inacceptable — manque de place par exemple.

Il est impossible de passer en revue toutes les applications auxquelles se prête le courant pour la distribution de l'énergie. Nous nous contenterons d'indiquer seulement quelques cas.

Ventilateurs, essoreuses, etc. — En raison de la grande vitesse demandée par les appareils on peut adopter l'accouplement direct ; la figure 632 repré-



Fig. 632.

sente un petit ventilateur d'appartement construit par les *ateliers d'Œrlikon* et pouvant se brancher facilement, au moyen d'une prise de courant, sur un circuit d'éclairage.

On peut disposer d'une manière semblable les grands ventilateurs ou machines soufflantes destinés à l'industrie métallurgique ou aux puits de mine.

Les pompes centrifuges se montent de même.

Dans les essoreuses, turbines, etc., le moteur est placé au-dessus de la machine ; son axe est vertical. On préfère dans ce cas aux moteurs continus des moteurs à champ

tournant sans collecteur car cette partie serait exposée aux projections liquides qui gêneraient le fonctionnement du récepteur.

Tissage. — Les métiers à tisser exigent une puissance peu considérable : un

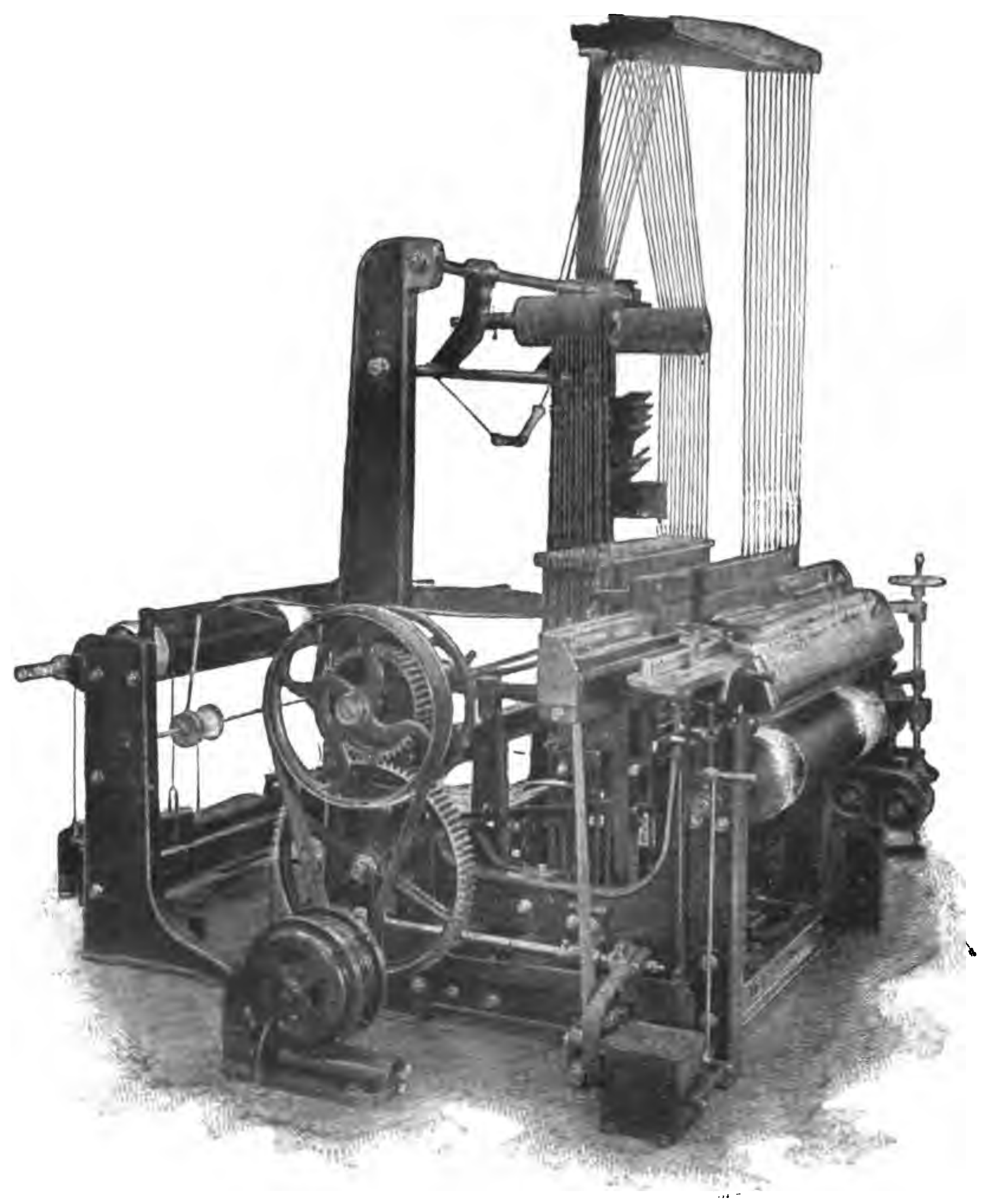


Fig. 634

quart de cheval suffit à les actionner mais quand on les commande par moteur à vapeur

et par l'intermédiaire de transmissions comme dans la plupart des tissages, il faut compter sur une perte d'énergie d'environ $\frac{1}{8}$ de cheval : telle est la puissance absorbée par le métier marchant à vide. Cette circonstance se produisant assez souvent il y a de ce fait une grande consommation inutile de travail et par suite de charbon.

L'emploi de moteurs électriques évite ce gaspillage de puissance. On est entré dans cette nouvelle voie en groupant d'abord autour de chaque réceptrice un certain nombre de métiers, mais ce n'était pas un remède radical; le moyen de supprimer toute transmission mécannique est de donner à chaque métier son moteur.

On a vu (fig. 627) les moteurs employés par la Société d'Œrlikon : ils sont triphasés et placés directement au-dessous de la poulie d'actionnement du métier, articulés d'un côté autour d'un axe faisant corps avec la plaque de fondation et de l'autre suspendus par un ressort, de façon qu'une partie du poids du moteur donne à la courroie de commande la tension convenable.

La figure 634 représente un métier à tisser possèdant ce moteur.

La mise en marche se fait au moyen d'un interrupteur électrique mais pour respecter les habitudes, ce qui est capital, on manœuvre cet appareil par un levier identique à celui qui sert à l'embrayage des métiers ordinaires.

Arts mécaniques. — Scieries. — Les perceuses sont très souvent commandées par l'électricité. Quand l'atelier est éclairé électriquement, on peut faire usage de moteurs appropriés au genre de courant dont on dispose ; la consommation d'énergie

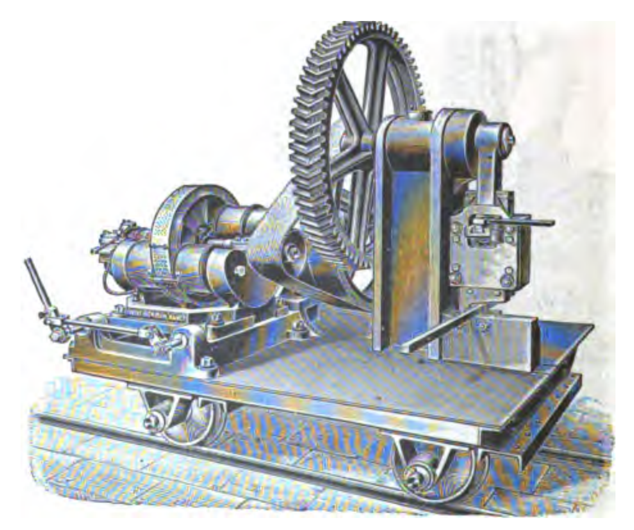


Fig. 635.

est peu considérable. On construit de petits appareils à main destinés à remplacer avantageusement les drilles. Pour des travaux plus importants l'outil est fixé à la pièce à percer, le moteur lui transmet son mouvement par un arbre flexible.

Les *tours* peuvent être actionnés de même. La disposition Siemens, assez répandue, consiste à faire agir une partie du poids du moteur pour tendre la courroie de commande. Cette tension peut être modifiée, à volonté par le déplacement d'une poulie intermédiaire dont l'arbre est porté par deux bras articulés.

On construit également des *cisailles* quelquefois très puissantes. On voit, figure 634, un appareil de la maison Fabius Henrion; il est transportable et de plus automobile. Le moteur, monté avec la cisaille sur un même chariot, prend le courant à une canalisation à fils nus au moyen d'un trolley. La réduction de vitesse est obtenue, comme l'on voit, par courroie et engrenages.

Le levier que l'on aperçoit en avant du chariot est destiné à faire commander, par le moteur, le mouvement de l'ensemble; on peut ainsi amener la cisaille en tous les points de l'usine desservis par les rails.

On trouve encore des *machines à mortaiser*, *à cintrer* et *à redresser*, des *emporte-pièces*, des *machines à raboter*, etc. de toutes dimensions actionnées par des moteurs continus ou à champ tournant.

Les diverses opérations des scieries mécaniques qui exigent des appareils à grande vitesse s'effectuent aisément par moteurs électriques, scies circulaires et à ruban, machines à raboter, etc.

Appareils de levage. — Nous pouvons les classer de la manière suivante :

1° Treuils, monte-charges et ascenseurs ;

2° Grues;

3° Ponts roulants.

Les *treuils* d'une manière générale comportent un tambour entraîné d'une façon quelconque, par un moteur électrique.

Nous décrirons sommairement, à titre d'exemple, le treuil système *Singre*, qui figurait à l'Exposition de 1900 (*Compagnie Electro-mécanique*).

Cet appareil se propose d'obtenir un embrayage *progressif* par friction, en évitant le glissement sur les génératrices de contact et de plus un débrayage avec frein d'arrêt ; il est représenté par la figure 636; l'arbre moteur g entraîne un galet G en contact par ses génératrices o et p avec deux poulies A et B situées dans le plan de rotation de G. Ce contact est obtenu par la courroie élastique c qui enveloppe les trois poulies.

Une seconde courroie élastique F est placée sur les prolongements des moyeux de A et de B ; son but est d'atténuer les réactions dans les coussinets des arbres a et b.

Sur les jantes de A et de B sont placés des bandages métalliques m fous sur ces jantes, avec interposition d'un cuir.

On voit donc que la courroie C tend à rapprocher les deux *bandages* tandis que F agit sur les *jantes*.

La pression exercée par les courroies est réglée au moyen d'un levier articulé librement sur l'arbre g et relié par deux bielles D et D' aux coussinets des arbres a et b. Suivant la

position donnée à ce levier, on bloque les jantes sur des sabots S et S', ou bien on

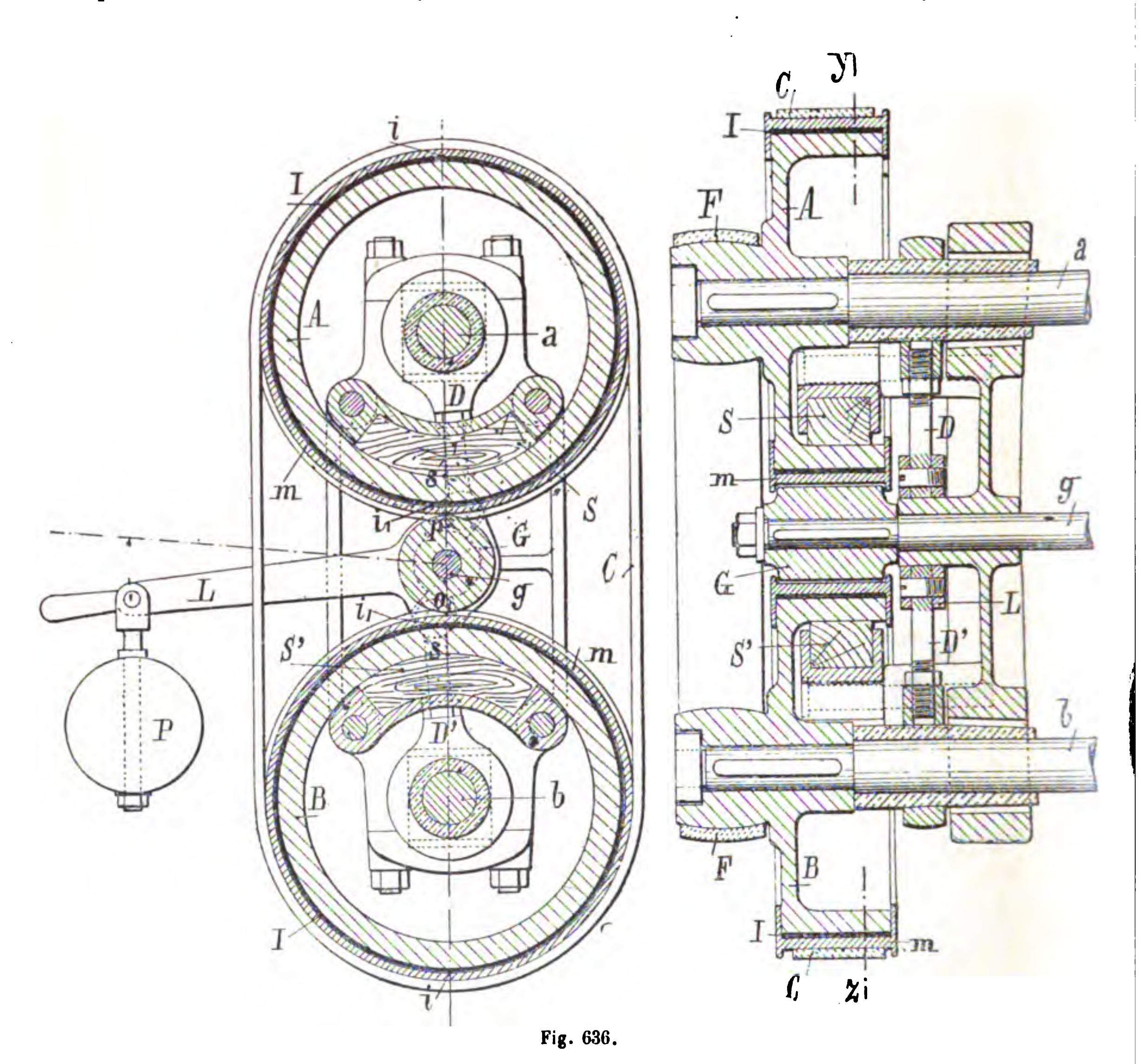


Fig. 636.

serre les bandages sur les génératrices o et p du galet G. Les figures supposent l'appareil débrayé et maintenu dans cet état par le contrepoids P. Si l'on veut embrayer le moteur électrique ayant été mis en mouvement, on soulève le levier et l'opération s'effectue en passant par les phases suivantes :

1° Entraînement des bandages par le galet G ;

2° Les jantes A et B, sollicitées par la seconde courroie F, viennent s'appuyer en ii sur les bandages ; elles sont entraînées progressivement à la volonté de l'opérateur et le glissement de la période d'embrayage a lieu sur toute la surface commune à la jante et au bandage.

Le débrayage est obtenu en ramenant le levier à sa première position ; l'arrêt est très rapide.

On a soin d'ailleurs de disposer un volant puissant sur l'arbre *g* de façon à éviter les variations trop fortes de courant à la mise en marche.

Le système indiqué constitue une première réduction de vitesse. La seconde est produite par un train d'engrenages, commandé par l'arbre *a*, et fonctionnant dans un carter évitant les poussières.

Dans les *ascenseurs*, l'accouplement se fait généralement par vis sans fin. Le changement de marche est obtenu *mécaniquement* ou *électriquement*, et, dans tous les cas, il faut un appareil de commande automatique agissant sur le rhéostat de manière à produire un démarrage et un arrêt le plus doux possible.

1° Dans la commande *mécanique*, les plots du rhéostat de démarrage sont ordinairement montés sur la même plaque que le commutateur et la corde de commande du mouvement agit sur la manette de façon à introduire la résistance voulue pour le démarrage. Quand l'ascenseur est en marche, le rhéostat est mis automatiquement et progressivement en court-circuit. L'arrêt est accompagné d'un jeu semblable et automatique du rhéostat.

Pour obtenir le changement de marche (*ascension* ou *descente*) il y a divers moyens ; on peut en particulier faire usage du suivant :

Entraîner deux poulies folles sur un même arbre, par une courroie sans fin qui passe en outre sur la poulie du moteur et sur un galet tendeur. On accouple alors l'une ou l'autre de ces deux poulies, au moyen d'un manchon conique à l'axe de la vis sans fin qui commande le tambour de l'ascenseur. Sur ce tambour s'enroulent les câbles de suspension de la cage.

2° Dans la commande *électrique*, on a généralement un rhéostat de démarrage manœuvré par un moteur électrique auxiliaire. La manette du commutateur est amenée soit à droite, soit à gauche par la corde de commande de l'ascenseur ; le rhéostat est alors en entier dans le circuit, mais un accouplement magnétique intervient pour mettre en marche le moteur auxiliaire qui amène progressivement le rhéostat au court-circuit. Pour l'arrêt, la corde amène la manivelle du commutateur dans sa situation de repos, l'accouplement magnétique est désembrayé ce qui réintroduit toute la résistance dans le circuit.

Certains monte-charges sont disposés différemment ; la figure 637 représente un type des *ateliers d'Œrlikon* dans lequel le moteur, au lieu d'être fixe, se déplace avec le fardeau à soulever. Le moteur de 9 chevaux, est triphasé et le courant lui arrive par trois frotteurs et trois barres qui courent le long de la cage. Le mouvement est transmis avec réduction de vitesse, à deux roues dentées qui engrènent avec une crémaillère double disposée dans toute la course. Des galets roulant le long des montants des crémaillères servent de guides. Un frein à ruban manœuvré par le levier figuré en avant permet d'arrêter le moteur.

2° Les *grues* peuvent se partager en deux catégories : les *grues tournantes* fixes

qui servent à élever ou à descendre et distribuer des fardeaux dans un espace donné et les *grues roulantes* qui sont destinées à un transport plus étendu.

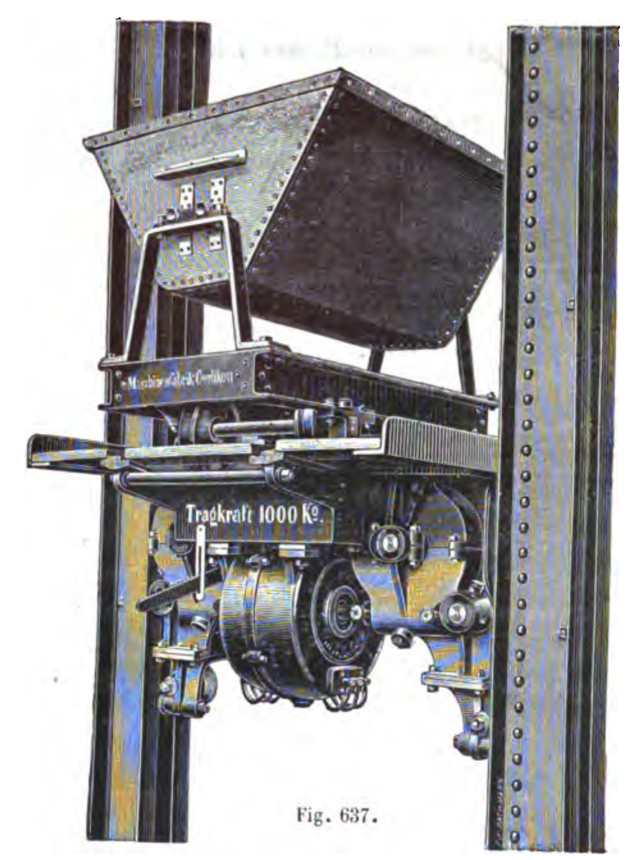


Fig. 637.

Si nous prenons le cas le plus compliqué, celui d'une grue roulante, nous avons trois mouvements à assurer : le *levage*, la *rotation* et l'*avancement*. Si l'on veut que la manœuvre soit seulement électrique, il faut trois moteurs distincts qui transmettent leurs mouvements par l'intermédiaire de vis sans fin. Les changements de sens s'obtiennent par inversion du courant dans les induits généralement et le commutateur qui assure ce renversement doit couper le circuit dans l'intervalle.

On a reproduit (fig. 638) une *grue roulante* de 6 tonnes des ateliers *Fabius Henrion*. Sa course est de 80 mètres et sa flèche a une portée de 5 mètres. La grue peut donc desservir un espace de 80×10.

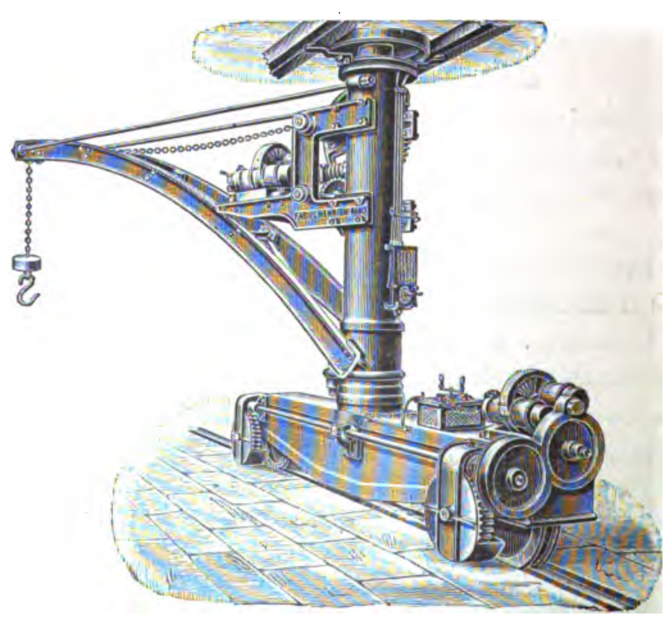


Fig. 638.

Elle se déplace sur un monorail et sa colonne est guidée, par sa partie supérieure, au moyen d'un galet qui roule sur deux fers à T.

Deux fils nus amènent le courant nécessaire aux moteurs; on voit, sur le chariot, celui qui est destiné à la translation, avec son régulateur. Le renversement de marche est obtenu par l'inversion du courant dans les inducteurs de ce moteur.

Le moteur qui commande le levage est placé sur la traverse qui relie la colonne à la flèche et il possède aussi un régulateur de vitesse. Ce récepteur électrique peut former frein quand la charge descend : il est alors *entraîné* par le poids et devient ainsi générateur d'électricité, le courant engendré s'opposant à la continuation du mouvement.

3° Les *ponts-roulants* comportent également trois mouvements : *levage, déplacement du chariot, translation du pont.* Dans certains cas, un seul moteur électrique est disposé dans une cabine à l'une des extrémités du pont, avec tous les accessoires de réglage et de commande. Des modes mécaniques d'embrayage permettent alors au mécanicien de provoquer les divers mouvements dans l'un ou dans l'autre sens.

Le plus généralement chaque mouvement est assuré par un moteur particulier que l'on commande, du sol même de l'atelier, au moyen de cordons de tirage agissant sur des interrupteurs et des rhéostats de réglage.

La figure 639 reproduit un pont roulant de 65 tonnes, des *ateliers d'Œrlikon* ; le chariot porte deux moteurs à courant continu, l'un de 36 chevaux-vapeur pour le levage, l'autre de 7,5 pour la translation du chariot. On aperçoit sur le dessin, les organes de réduction de vitesse.

Agriculture. — Les principales applications que l'on peut citer sont les machines à battre, les charrues, les hache-paille, etc.

Les machines à battre sont entraînées par courroie au moyen d'un moteur porté sur un chariot. L'appareil peut être placé soit dans la grange, soit à l'extérieur, mais dans tous les cas, il doit être préservé de la pluie et des poussières au moyen d'une enveloppe hermétique qui ne laisse passer que la poulie motrice et l'axe du rhéostat de démarrage. Des regards vitrés permettent de surveiller collecteur et balais. Le courant est amené au moteur au moyen d'une fiche de contact reliée par câble à une prise voisine. Les moteurs à champ tournant, sans balais ni collecteur sont très recommandables dans cette application spéciale.

Le labourage électrique est une des premières applications qui a été faite à l'agriculture. Les essais primitifs, déjà anciens, ont été effectués par MM. Chrétien et Félix. Aujourd'hui la charrue est généralement actionnée dans les deux sens, par le même moteur qui est disposé sur un chariot à l'une des extrémités du sillon. A l'autre extrémité est placé un autre chariot portant une poulie sur laquelle passe le câble qui entraîne la charrue et qui retourne ensuite au treuil-moteur. La simple manœuvre d'un levier produit le mouvement de la charrue dans un sens ou dans l'autre. On remarque que le câble n'est tendu que dans un seul sens (qui dépend du sens de la

charrue). Il est donc très facile de retirer les ancres qui maintiennent les chariots quand le sillon est terminé.



Fig. 639.

Le courant est amené au moteur au moyen d'une ligne aérienne sur laquelle peuvent glisser les conducteurs de prise.

Les hache-paille sont reliés au moteur électrique par courroie. La puissance absorbée est peu considérable et l'électromoteur est de petites dimensions. Ce dernier ne demande pas d'ailleurs comme celui des machines à battre, une fermeture hermétique car il fonctionne généralement dans un lieu couvert et de plus il est moins exposé aux poussières.

Les diverses autres opérations agricoles peuvent encore s'effectuer électriquement. Dans un grand nombre de cas, on peut d'ailleurs utiliser les anciennes locomobiles qui existent pour la commande de la dynamo génératrice.

Mines. — Le transport électrique de l'énergie se prête à une foule d'applications dans les mines. Nous citerons parmi les principales :

1° Le transport des minerais dans les galeries soit au moyen d'un cabestan mû par moteur-série, soit par de véritables locomotives dont la construction et la disposition dépendent des conditions locales.

2° Forage des roches, havage, levage, etc.

3° Ventilation au moyen d'ailettes dont la couronne est calée directement sur l'axe du moteur-série.

4° Epuisement par pompes entraînées au moyen de moteurs-série. Ces pompes foulantes, reliées au moteur par un train d'engrenages, peuvent être accouplées. On emploie souvent des pompes à triple effet et, quand la profondeur est trop considérable on fractionne quelquefois la hauteur en disposant des réservoirs aux divers étages.

L'eau reçue dans l'un d'eux est renvoyée par un système de pompes dans le bac immédiatement supérieur.

Au lieu des pompes foulantes, on emploie aussi les appareils centrifuges et il est possible encore d'en conjuguer plusieurs pour augmenter l'effet produit.

Dans tous les cas où il est fait usage de moteurs électriques dans les mines, il y a différentes précautions à prendre : notamment éviter pour les moteurs la poussière et l'humidité. Dans les mines à charbon, on doit tenir compte des dangers d'explosion du grisou par les étincelles. Quand on emploie le courant continu, on a des moteurs hermétiquement fermés ou aérés seulement par des ouvertures munies de toiles métalliques serrées. Avec les moteurs à champ tournant, sans balais ni collecteur, tout danger est supprimé de ce côté. Il faut de plus éviter toute rupture de conducteur capable de donner lieu à des étincelles, ces accidents pourraient être causés par des frottements répétés des éboulements etc. On doit donc protéger les fils qui descendent dans les puits d'une enveloppe de bois. Les conducteurs, dans les galeries, sont isolés avec soin ; ils sont sous plomb et cette gaine est recouverte elle-même de chanvre goudronné et de bandes de toile paraffinée. Les fils secondaires flexibles reçoivent une couverture de caoutchouc vulcanisé et, par dessus, une gaine de chanvre.



Dans les carrières, les travaux d'extraction, de levage, de transport s'effectuent également par l'électricité.

Navigation et aérostation. — L'application de l'électricité aux canots de plaisance est un fait acquis depuis longtemps et au point de vue du confortable, le système est bien préférable à l'emploi des moteurs mécaniques : des accumulateurs chargés au départ actionnent un moteur qui agit sur l'hélice. Les premiers bateaux électriques faisant an service régulier de voyageurs ont été installés à Bergen (Norvège) il y a un certain nombre d'années ; ils sont à deux hélices, situées aux deux extrémités de l'embarcation, et commandées chacune par un moteur électrique.

Pour des trajets importants, on a, dans quelques cas spéciaux, utilisé l'énergie des cours d'eau eux-mêmes : des génératrices, alimentées par des chutes ménagées en divers points, envoient le courant dans une ligne qui suit la rivière ; la prise se fait par archet ou par trolley et le récepteur tourne en actionnant les hélices.

Les diverses machines auxiliaires en usage sur les bateaux ou sur les navires sont très souvent actionnées électriquement : monte-charges, grues, cabestans, etc. et, dans la marine de guerre, tourelles, manœuvre des pièces, pointage, etc.

Citons encore le dragage, manœuvre des écluses, etc.

L'*aérostation* a recours à l'électricité également ; les premiers essais sont dus à Tissandier : quelques éléments de piles au bichromate alimentaient un petit moteur, genre Siemens, faisant une centaine de kilogrammètres par seconde. Cette réceptrice commandait une roue à ailettes servant de propulseur.

Depuis, tous les expérimentateurs qui ont étudié la direction des aérostats ont eu recours à des appareils de même genre.

CHAPITRE X

TRACTION ÉLECTRIQUE

Principe. — La voiture automobile électrique porte un ou plusieurs moteurs alimentés par un courant convenable.

Les récepteurs tournent et entraînent avec eux les essieux. Mais ordinairement la vitesse des moteurs n'est pas compatible avec les vitesses habituelles ou même avec celles que l'on peut atteindre sans danger. Il faut donc la diminuer ordinairement, par une transmission intermédiaire (réduction simple ou double).

Certains essieux, ceux des locomotives notamment, peuvent cependant recevoir directement le mouvement ; mais la liaison de l'arbre du moteur à l'essieu n'est pas rigide ordinairement ; on doit éviter à l'induit les chocs résultant de toutes les inégalités de la voie; pour y arriver, on peut faire agir le moteur électrique sur un cylindre creux concentrique à l'essieu et accouplé à ce dernier par trois doubles ressorts en acier logés entre les bras de l'une des roues.

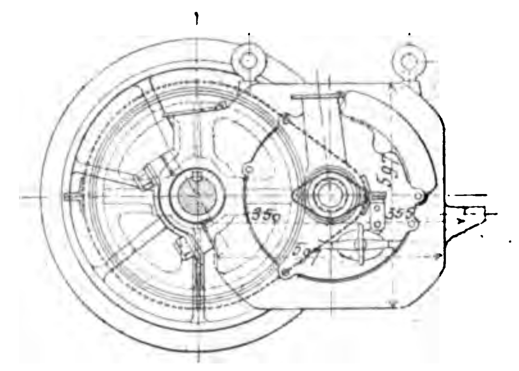
Nous distinguerons deux cas dans cette étude de la traction, celui des voitures *automotrices*, possédant leurs moteurs propres, et celui des *locomotives* destinées à entraîner d'autres voitures sans équipement électrique. Les deux cas répondent respectivement aux *tramways* et aux *chemins de fer* électriques.

Moteurs adoptés dans les voitures automotrices. — Jusqu'ici on a fait presque toujours usage du courant continu ; on cite quelques applications seulement des courants triphasés.

Ces récepteurs doivent satisfaire à certaines conditions particulières : légèreté, peu d'élévation, solidité spéciale, en raison des grandes variations de charge auxquelles ils sont exposés. Les balais ordinairement sont en charbon et on les place dans une position invariable sur la ligne neutre, l'induit pouvant tourner dans les deux sens.

On adopte souvent, pour le cas spécial des tramways, une tension de 500 volts environ. La figure 640 représente un moteur de la Compagnie de Fives-Lille : il est à quatre pôles et d'une puissance de 15 chevaux. L'induit est annulaire, et toutes les précautions sont prises pour éviter les communications des conducteurs et du noyau.

Ces fils sont logés dans des rainures pratiquées longitudinalement dans l'ensemble des tôles qui forment l'armature, chacune de ces rainures étant garnie de micanite.



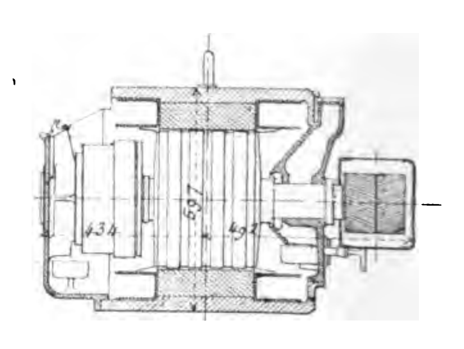
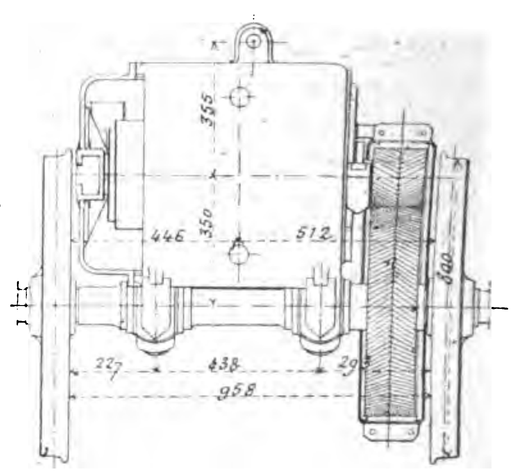


Fig. 640.

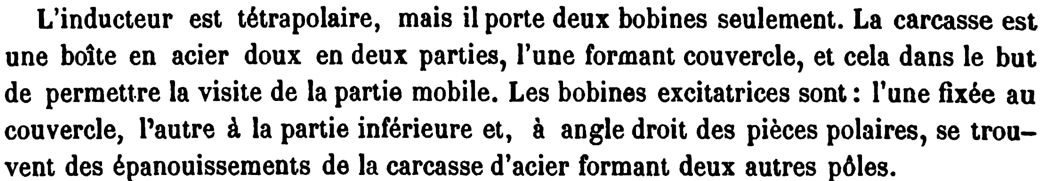


La carcasse inductrice est en acier fondu extra doux et présente quatre culasses avec pièces polaires épanouies qui retiennent les enroulements sur leurs supports.

Chaque bobine inductrice est partagée en trois sections et les quatres parties semblables (une de chaque bobine) sont associées en tension.

Le système de réduction de vitesse est constitué par des engrenages à chevrons et une boîte de tôle enveloppe le tout.

Nous indiquerons une seconde forme de moteurs très employée en France : c'est le modèle de la Société française *Thomson-Houston* (fig. 641).



L'inducteur est tétrapolaire, mais il porte deux bobines seulement. La carcasse est une boîte en acier doux en deux parties, l'une formant couvercle, et cela dans le but de permettre la visite de la partie mobile. Les bobines excitatrices sont : l'une fixée au couvercle, l'autre à la partie inférieure et, à angle droit des pièces polaires, se trouvent des épanouissements de la carcasse d'acier formant deux autres pôles.

Les bobines induites sont montées sur une armature en disques de tôle vernis et présentant des encoches, ce qui donne une grande solidité à la partie mobile ; l'enroulement des fils de ce moteur multipolaire est en série ; il y a seulement alors deux balais qui sont en charbon cuivré.

La vitesse de rotation est relativement peu considérable, et la réduction se fait au moyen d'un pignon d'acier monté sur l'arbre du moteur et d'un engrenage de fonte qui commande l'essieu. Ce système de transmission plonge complètement dans l'huile dans le but d'adoucir le mouvement.

Certains moteurs Thomson-Houston pour tramways, employés en Amérique, ont une

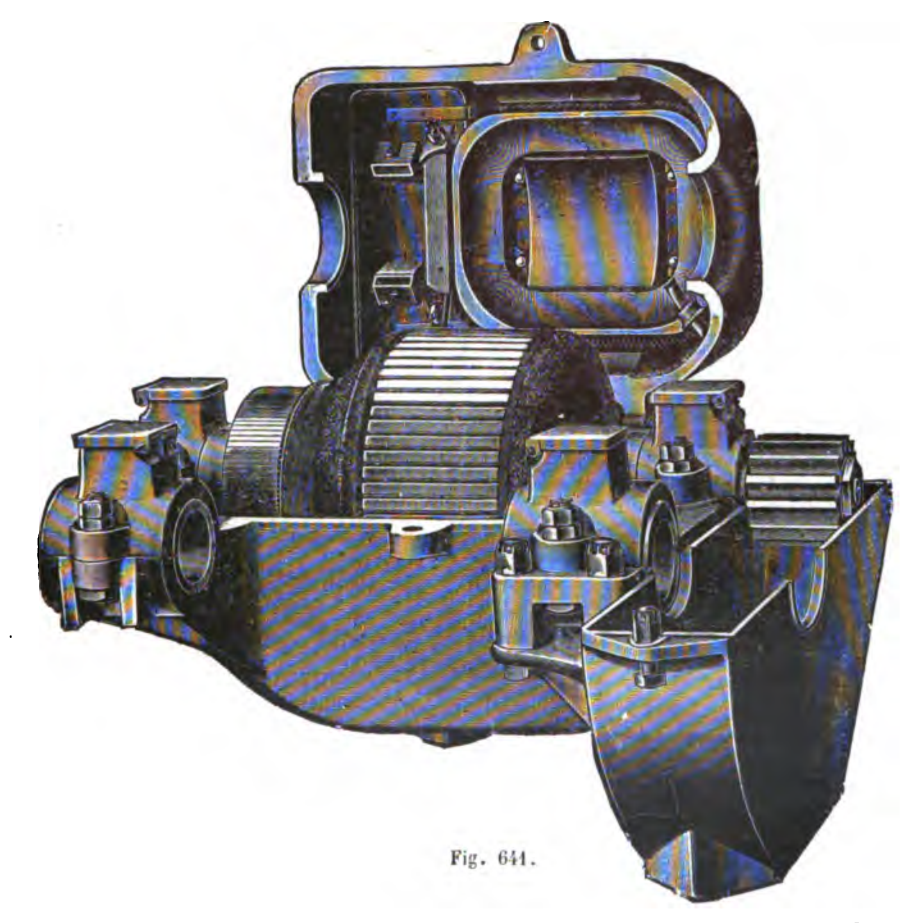


Fig. 641.

seule bobine magnétisante et deux pôles A et B (fig 642). La réduction de vitesse a

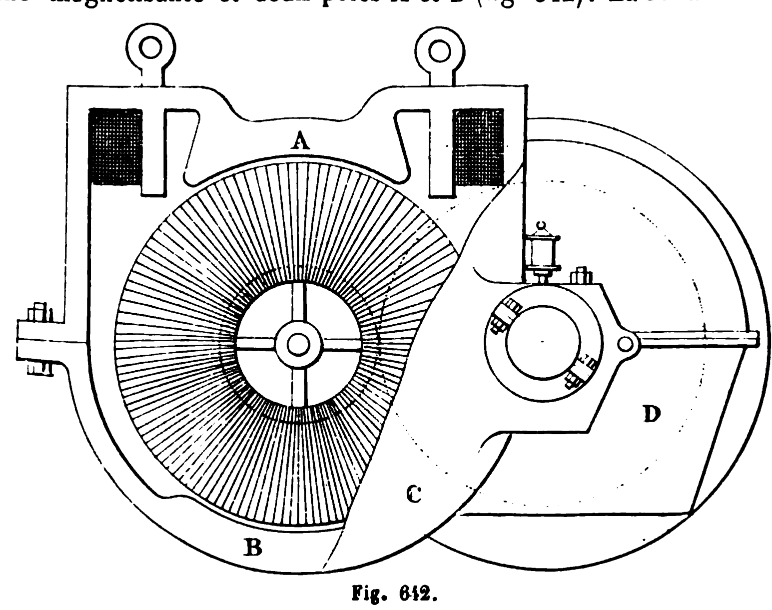


Fig. 642.

toujours lieu, de la même manière, par engrenages baignés dans l'huile d'un réservoir D en cuivre.

La fig. 643 représente enfin un moteur spécial des *ateliers d'Œrlikon*, dont la puissance nominale est de 20 chevaux. La partie électrique est complètement enfermée dans une carcasse d'acier coulé servant de circuit magnétique. A l'intérieur de cette boîte sont vissés les 4 pôles inducteurs, formés de tôles assemblées; les bobines inductrices, reliées en série, sont maintenues sur leurs noyaux par les pièces polaires.

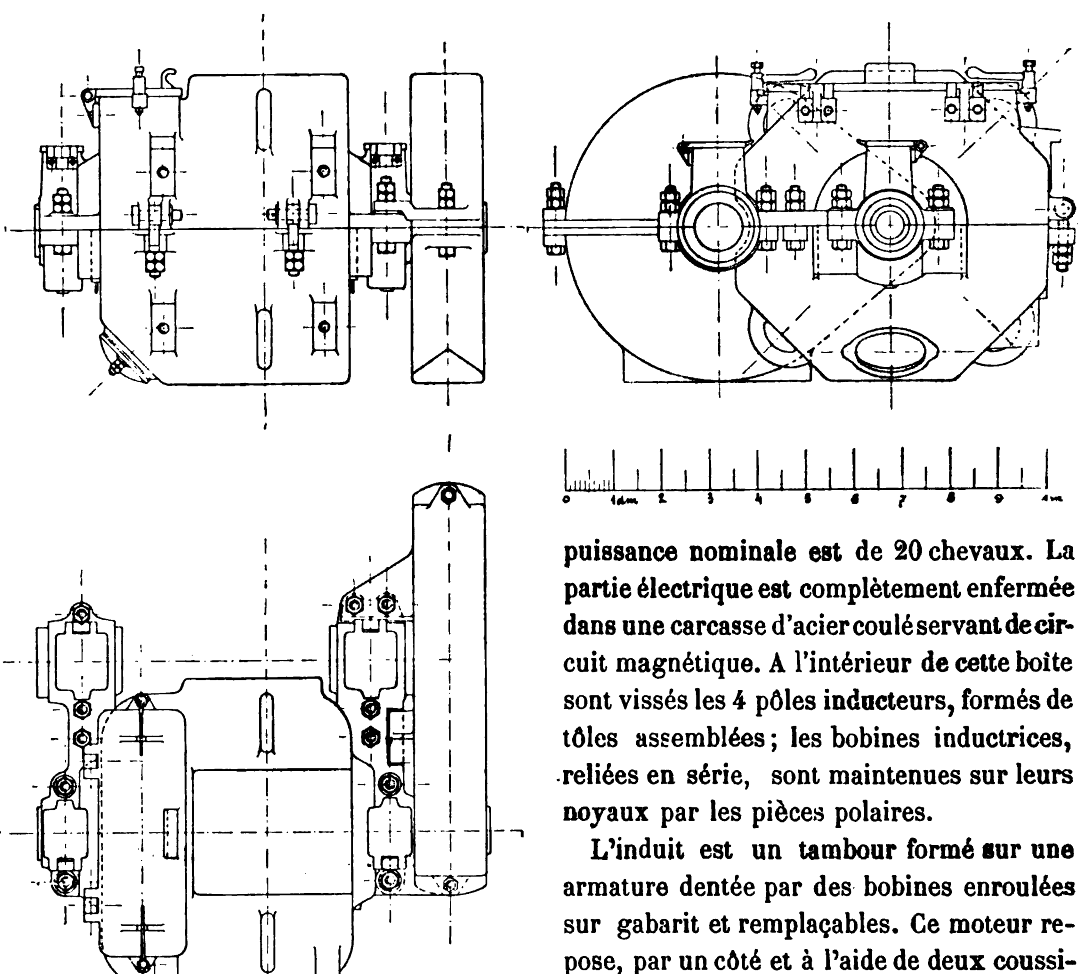


Fig. 643.

L'induit est un tambour formé sur une armature dentée par des bobines enroulées sur gabarit et remplaçables. Ce moteur repose, par un côté et à l'aide de deux coussinets, sur l'essieu à actionner; de l'autre il est fixé à une traverse qui est suspendue par ressort au châssis de la voiture.

Il y a généralement deux moteurs électriques par voiture; un seul suffit à assurer le service en temps ordinaire mais les deux peuvent s'aider dans les rampes et, en cas d'avarie à l'un des systèmes, il n'y a jamais d'arrêt complet.

Ordinairement la partie électrique est fixée à un truc indépendant de la caisse du tramway.

Divers procédés de traction électrique. — Nous pouvons distinguer *a priori* deux procédés :

1° *Par accumulateurs.* On place, dans les voitures, un certain nombre de couples secondaires que l'on remplace par d'autres quand la somme d'énergie emmagasinée est dissipée ; ou bien encore la charge des accumulateurs se fait sur place, dans la voiture même, avant le départ.

2° Au moyen de *génératrices fixes* reliées par conducteurs aux moteurs des voitures. Cette dernière méthode ne s'applique qu'à des itinéraires invariables tandis que l'autre procédé permet la circulation sur routes quelconques.

Suivant la façon de relier le poste générateur aux moteurs des véhicules, on a divers systèmes très différents de traction:

a) Par *fil aérien*;

b) Par *rail conducteur* ;

c) Par *conducteurs souterrains* mis en caniveaux;

d) Par *contacts superficiels*, au niveau du sol, reliés automatiquement à la génératrice au moment du passage de la voiture.

Ainsi nous avons en somme cinq procédés de traction que nous allons étudier successivement.

Traction par accumulateurs. — Le moyen présente sur les autres certains avantages: suppression des conducteurs, itinéraire facultatif; de plus les machines génératrices sont mieux utilisées que dans tout autre système car toute l'énergie produite pour la charge est mise en réserve dans les couples secondaires et elle est utilisée au fur et à mesure des besoins.

Seulement il y a des inconvénients et notamment le poids mort considérable ; on compte en effet 4.000 kilogrammes environ d'accumulateurs pour une voiture de 50 personnes. Il faut encore y ajouter la détérioration rapide des plaques et surtout des plaques positives sous l'influence des trépidations.

Les accumulateurs sont ordinairement répartis en plusieurs batteries disposées dans des tiroirs introduits sous les banquettes du tramway. Des panneaux permettent l'enlèvement des tiroirs et les communications électriques s'établissent d'elles-mêmes par des bandes métalliques fixées les unes à la voiture, les autres au tiroir.

Quand les éléments secondaires sont déchargés, on les amène à l'usine et on les fait passer rapidement, avec leurs tiroirs, sur les tables de charge. On a également imaginé des fourgons spéciaux portant les accumulateurs seulement et que l'on envoie seuls à l'usine, ou bien encore on munit la voiture d'une prise de courant qui permet d'effectuer la charge pendant que la voiture est en stationnement.

Citons, à titre d'exemple, les voitures automotrices construites par la *Compagnie de Fives-Lille* pour la *Compagnie générale des Omnibus de Paris* (ligne Louvre-Vincennes). La batterie du type Blot, est logée sous les banquettes ; son poids atteint 4.700 kilos pour une voiture de 52 voyageurs ; deux moteurs à quatre pôles placés entre les essieux sont à simple réduction de vitesse.



Au lieu des accumulateurs au plomb, on a fait usage quelquefois de couples en cuivre, ce qui a permis de réduire notablement le poids mort.

Traction par conducteurs aériens. — De l'usine centrale partent des fils qui suivent les itinéraires fixés, et un contact, que nous allons maintenant examiner, relie le fil au moteur disposé sur la voiture. Le premier système employé par la maison Siemens et Halske, et qui est encore en usage à Clermont-Ferrand, consiste à prendre des tubes creux en cuivre et fendus sur toute leur longueur. Dans ces tubes glisse une navette formée de tronçons de cuivre ayant la forme d'olives. Chacune de ces parties comprend d'ailleurs deux pièces séparées par un ressort à boudin dans le but d'assurer un contact suffisant. Cette navette est reliée au moteur de la voiture par un câble conducteur souple. Le véhicule entre en mouvement et remorque, par le câble, le frotteur de cuivre le long du tube. Un accident possible, mais en réalité peu fréquent, est la rupture du câble par suite d'un coincement de la navette dans le tube.

Un autre procédé plus simple imaginé par les mêmes constructeurs consiste à faire usage, comme conducteur tendu le long de la voie, d'un simple fil au-dessous duquel frotte un cadre métallique réuni électriquement au moteur.

Mais le moyen le plus pratique, et toujours adopté dans les installations actuelles, est celui du *trolley,* imaginé par M. Van Depoele : le conducteur est en cuivre ou en bronze de haute conductibilité ; son diamètre est d'environ 8 millimètres ; il est tenu par des pièces isolantes fixées à des potences ou suspendues à des fils transversaux en acier ; ces fils sont attachés soit aux maisons qui bordent la voie par l'intermédiaire de rosaces, soit à des pylônes plantés de chaque côté des rails.

Le trolley consiste en un galet porté à l'extrémité d'un tube creux en fer articulé sur le toit de la voiture. Dans le modèle de Fives-Lille, la perche du trolley reçoit à sa partie supérieure un tube à gaz en fer auquel on rive une fourche supportant la roulette. Ce galet roule *sous* le fil conducteur qui est logé dans la gorge de la roue. Un balai en charbon vient frotter la partie inférieure de la roulette et se trouve en communication électrique avec le moteur. De cette manière on est assuré d'un bon contact entre le fil conducteur et le récepteur ; mais c'est à la condition que la poulie exerce une certaine pression contre le fil. Un système de ressorts dont on règle la tension à volonté par une vis est chargé de ce soin. La perche du trolley peut d'ailleurs tourner autour d'un axe en même temps que le système tenseur et le tout est fixé à un châssis de bois monté, par l'intermédiaire d'amortisseurs en caoutchouc, sur le toit du tramway (fig. 644, modèle Fives-Lille).

Dans le système Thomson-Houston, la pression du trolley contre le fil est assurée d'une manière différente : la fig. 645 indique la disposition adoptée et en même temps la liaison des voitures à l'usine.

Le trolley ordinaire manque un peu de flexibilité dans le sens latéral ; il en résulte qu'on est obligé, pour empêcher le coincement de la roulette et le déraillement, de faire épouser au fil aérien toutes les sinuosités de la voie ; cela nécessite des fils *tendeurs* nombreux, justifiant le reproche adressé à ce mode de traction au nom de l'esthétique.

Pour éviter cet inconvénient, on peut employer *le trolley à chape tournante* ou l'*archet*. La première dispositior, un peu modifiée, a été appliquée à la ligne Romainville-Opéra à Paris ; l'archet, utilisé surtout par la Maison Siemens, comporte l'emploi

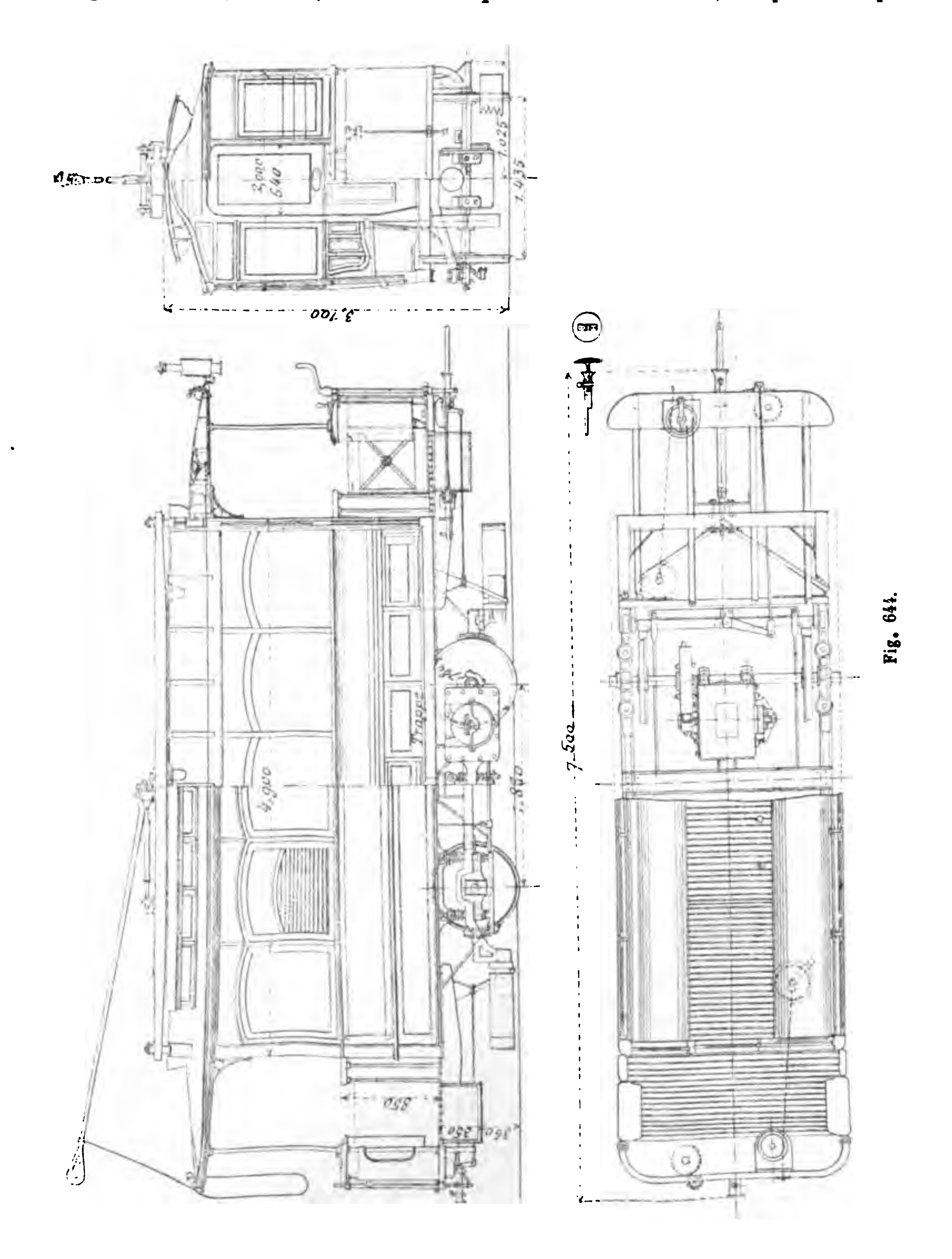


Fig. 644.

d'un cadre métallique qui vient frotter le fil aérien à sa partie inférieure; sa souplesse est surtout considérable dans le sens horizontal.

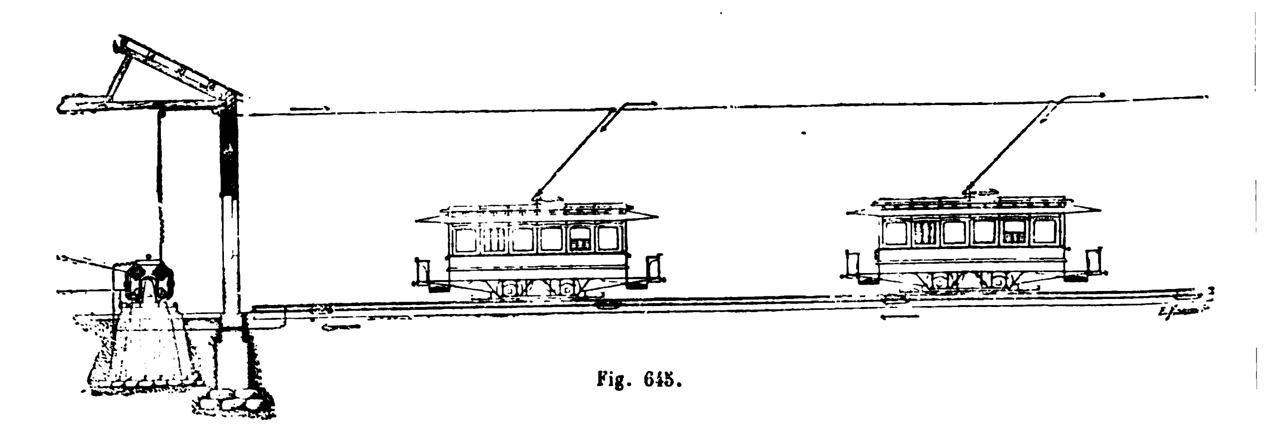


Fig. 645.

On peut diminuer l'usure du fil aérien par la disposition d'une roulette capable de se déplacer transversalement le long de l'archet.

On fait usage ordinairement de feeders pour l'alimentation du réseau. Ces artères sont en nombre variable et quelquefois souterraines; elles doivent être calculées de manière à maintenir le potentiel invariable aux centres de distribution. Les machines génératrices sont d'ailleurs hypercompoundées dans ce but. Le retour du courant a lieu généralement par les rails, et afin d'assurer une bonne continuité à cette partie de la canalisation, on réunit les rails consécutifs par des barres de cuivre. De plus un conducteur de même métal, enfoui dans le sol, court le long de la voie et se trouve relié de distance en distance aux rails de roulement.

La consommation d'énergie dans un réseau de tramways, est naturellement très variable d'un moment à l'autre ; il en résulte une marche irrégulière des génératrices et des machines à vapeur. Dans le but de régulariser cette marche, on fait quelquefois usage de batteries d'accumulateurs et de survolteurs-dévolteurs, comme on l'a indiqué page 521.

Traction par rail conducteur. — Le système ne diffère pas en principe du cas précédent. C'est d'ailleurs un des premiers que l'on a employés : le courant est amené aux voitures par un troisième rail sur lequel appuie un contact convenable ; le retour a lieu par les rails de roulement. Ce moyen, évidemment ne pourrait être employé dans les tramways sur route à cause du danger pour la circulation ; il doit être exclusivement réservé aux voitures circulant sur voies spéciales interdites au public.

Traction par conducteurs souterrains. — Les conducteurs sont placés en caniveau et la conduite est généralement fendue dans toute sa longueur pour permettre à des tiges, prises de courant, d'aboutir à ces fils. On a bien essayé de fermer cette

conduite, tout en permettant l'ouverture au moment du passage de la voiture, mais le système n'a pas réussi.

Ce caniveau peut occuper l'axe de la voie ou être disposé sous l'un des rails. Dans ce cas le contre-rail règne tout le long de la route du tramway, et les deux parties se trouvent complètement séparées l'une de l'autre pour permettre le passage du bras mobile qui porte les contacts. La fente peut avoir une ouverture variable : à Budapest, où le système a été appliqué depuis longtemps, la séparation des deux lames est de 4 centimètres. Le caniveau, dans le système Siemens, consiste en un canal de béton maintenu de distance en distance par un cadre de fer extérieurement et par une forme ovoïde à l'intérieur. Chaque ovale de fer porte des isolateurs *a* et *b* (fig. 646) qui sou-

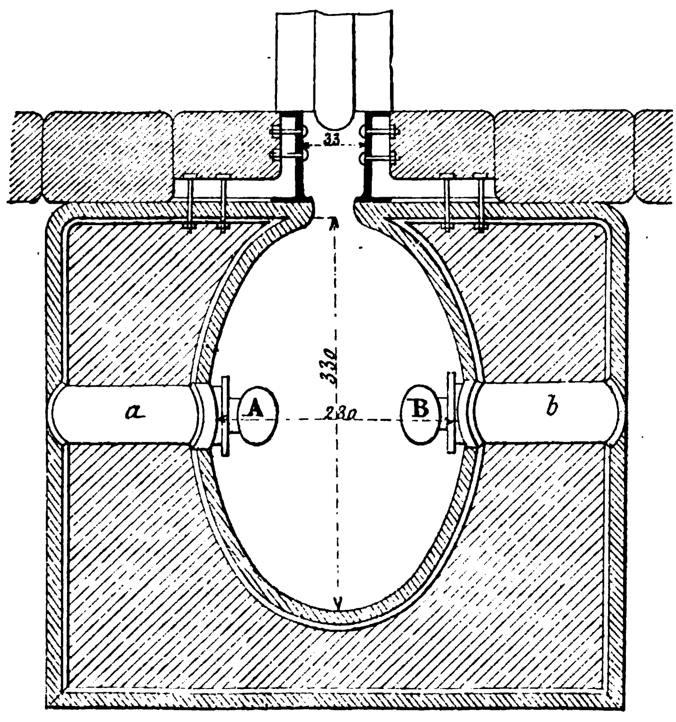


Fig. 646.

tiennent les fils conducteurs nus A et B. Sur chacun de ces fils roule un galet et les deux semblables sont disposés à l'extrémité du bras mobile porté par la voiture.

La méthode présente l'inconvénient de donner lieu à des courts-circuits si un objet métallique quelconque vient à s'engager dans la rainure ; d'un autre côté, les ordures diverses de la rue peuvent obstruer l'ouverture et enfin les eaux pluviales gênent beaucoup la prise du courant. Bien des modifications ont été proposées pour éviter ces inconvénients : le plus souvent les caniveaux sont en communication avec les égouts, ce qui permet l'évacuation des liquides et aussi le nettoyage de la conduite par une chasse d'eau puissante.

Diverses lignes de Paris sont disposées d'une manière analogue : par exemple, *Saint-Ouen-Champ-de-Mars,* de la *Compagnie générale parisienne des tramways*, qui peut également marcher au trolley.

On a imaginé aussi de faire servir les égouts eux-mêmes à la pose des fils et, dans ce cas, l'examen de la voie électrique est rendu très facile.

Traction par contacts superficiels. — On a imaginé de sectionner les rails et de mettre successivement, et d'une façon automatique, chaque segment en relation avec la ligne. Il s'ensuit que les courts-circuits ne pourraient se produire qu'au moment du passage de la voiture ; les sections deviennent inertes aussitôt que le véhicule est passé.

Les moyens imaginés pour appliquer ce principe sont nombreux : l'un des premiers dû à Lineff, consiste à faire usage d'un canal isolant contenant le câble conducteur relié à la station centrale. La partie supérieure du conduit est à peu près fermée par les patins de deux rails supplémentaires dont l'un seulement A vient au niveau du sol (fig. 647). Ce rail apparent est coupé en tronçons de deux mètres de longueur séparés par un petit intervalle.

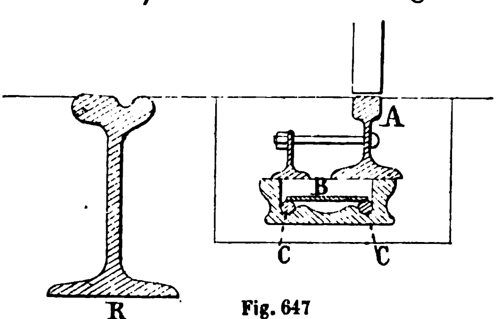


Fig. 647

Dans le caniveau se trouve, reposant sur le conducteur, une lame en fer flexible qui est à une faible distance des patins. Sur les rails sectionnés roulent deux galets portés par des bras situés sous la voiture et chaque galet est entouré d'une masse de fer qui constitue la pièce polaire d'un électro-aimant.

On comprend dès lors le fonctionnement du système : quand le véhicule repose sur un segment, le rail fait corps avec les pièces polaires et attire à lui la lame flexible sur une certaine longueur. Il en résulte une communication électrique entre le conducteur et le galet par l'intermédiaire de la lame de fer. Dès que la voiture a quitté le segment, la portion de la lame qui était soulevée retombe dans sa position première, et une autre partie établit le contact avec la section du rail située sous le tramway.

Le même principe a été utilisé de bien d'autres façons ; le système de MM. Claret et Vuillemier, installé à l'Exposition de Lyon (1894) est le premier établi en France : le rail sectionné occupe le milieu de la voie ; il est formé de tronçons de $2^m,80$ séparés les uns des autres par trois mètres environ. Ce rail a la forme ordinaire, mais il est renversé, et son patin se trouve à la partie supérieure au niveau du sol ; il est isolé par du bitume et des pavés de bois. Au-dessous de lui règne un caniveau étanche, en bois, destiné aux fils conducteurs. Le long de la voie court un câble bien isolé, et sous plomb, enfoui sous le sol des trottoirs ; et de distance en distance (100 mètres ordinairement) existent des distributeurs de courant que nous allons décrire :

Chaque distributeur comprend un axe vertical qui tend à tourner continuellemen

par l'action d'un poids et d'une transmission d'angle. Mais un électro-aimant fait enclencher une roue dentée solidaire du système et limite le mouvement. L'arbre entraîne avec lui un plateau isolant garni de deux bagues métalliques concentriques *b*, *b'* (fig. 648) prolongées chacune par un bras qui vient appuyer, en tournant, sur des plots fixes disposés autour du disque.

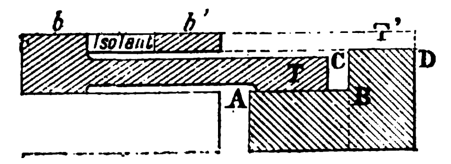
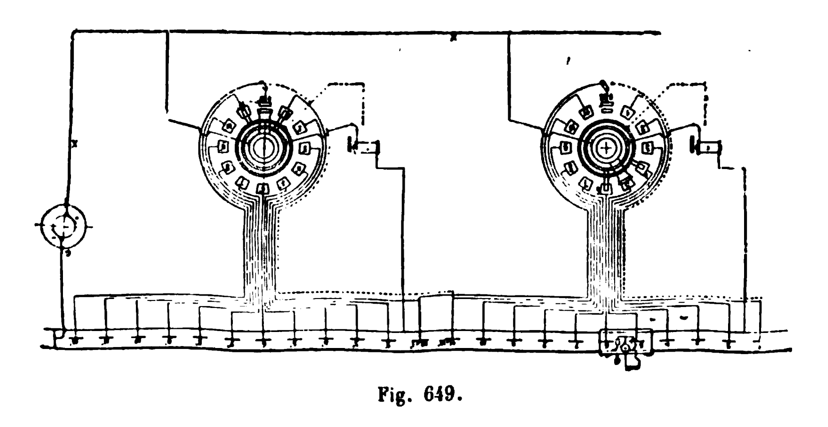


Fig. 648.

Les deux tiges n'ont pas la même longueur : l'une T vient frotter la partie inférieure AB du contact de cuivre ; elle est assez large pour toucher deux plots en même temps ; l'autre T' appuie sur CD et peut prendre contact avec une touche seulement ; on établit entre les deux une distance angulaire égale à l'intervalle de deux plots consécutifs; il en résulte que l'un des bras appuie sur une touche pendant que l'autre est en contact avec le plot suivant (fig. 649). Il y a dans le distributeur de 12 à 18 contacts semblables ; cependant l'un d'eux présente une légère différence avec les autres ; il est fendu suivant la direction CB (fig. 648, trait pointillé).


Fig. 649.

Chaque plot est relié à un segment de rail au moyen de fils passant dans le canal de bois; 12 à 18 rails sont donc desservis par le même distributeur. La figure 649 montre deux appareils destinés chacun à douze tronçons ; on voit le câble principal à la partie inférieure et, en haut, les rails de roulement réunis au pôle — et le rail sectionné.

Le câble principal est relié au disque *b* (fig. 648), de sorte que le courant est amené par le bras T à l'un des tronçons de rail ; de là il passe au moteur, puis aux rails qui assurent le retour à l'usine.

L'anneau *b'* communique avec le fil d'un électro dont l'autre extrémité est à la terre. Il résulte de la disposition relative des deux bras et de la largeur de T que l'électro-aimant est alimenté périodiquement par un courant dérivé entre un tronçon de rail et le sol ; le noyau agit alors sur une armature et déclenche ainsi la roue dentée du distributeur.

Nous pouvons maintenant comprendre le jeu des distributeurs. Supposons la voiture abordant le tronçon 5 (un peu à gauche de la position figurée). Le bras T est sur le

plot 5, T' est sur 6 ; la partie mobile du distributeur est au repos et le moteur électrique, alimenté de courant par la touche 5, tourne et amène l'avant de la voiture sur le rail n° 6 ; aussitôt le courant passe à l'électro, et le distributeur se met à tourner d'un douzième de tour : T' quitte 6 et vient toucher 7, tandis que T repose maintenant sur 6 : le courant d'alimentation du moteur entre donc par la section 6, et le système de réglage est au repos jusqu'à ce que la voiture vienne au contact de 7 en envoyant ainsi un nouveau courant dans l'électro.

Le mouvement continue ainsi et les deux bras mobiles finissent par arriver sur 12 et sur 11 ; la voiture a alors atteint la section 12, qui est marquée 12-1 sur le schéma.

Cette partie de rail se trouve reliée à la fois au plot 12 du premier distributeur et à la touche 1 du deuxième ; le premier disque tourne encore d'un douzième de tour, de sorte que T arrive sur 12 et T' sur 1.

En vertu du mode de liaison des fils et des touches, on voit que le distributeur n'alimente pas le rail n° 12, puisque le plot 12 est en deux pièces ; mais le second distributeur a avancé d'un cran en même temps que l'autre, désormais immobile ; ses bras sont venus respectivement sur 2 et sur 1 ; c'est par ce dernier plot 1 que le rail 12-1 est actuellement alimenté. A partir de cet instant, les diverses sections 12-1, 2, 3, etc., sont successivement desservies, et ainsi de suite.

Les tramways à contacts superficiels se sont développés depuis plusieurs années ; ils prennent leur courant à une série de plots ou de pavés métalliques disposés en une rangée parallèle aux rails de roulement. Parmi tous les systèmes proposés et employés nous décrirons le *Diatto* utilisé sur plusieurs lignes de Paris (*Tramways de l'Est parisien* par exemple).

Chaque *boîte de contact* est formée d'une masse d'asphalte A (fig. 650), dans laquelle est encastrée une pièce de fonte très perméable B ; sur cette partie repose le collier C, également magnétique qui embrasse un tube d'ébonite D contenant du mercure dans lequel plonge une sorte de clou E, en fer à tête de charbon. Au-dessus de cette pièce, on voit le cylindre de fer prolongé inférieurement par un bloc de charbon.

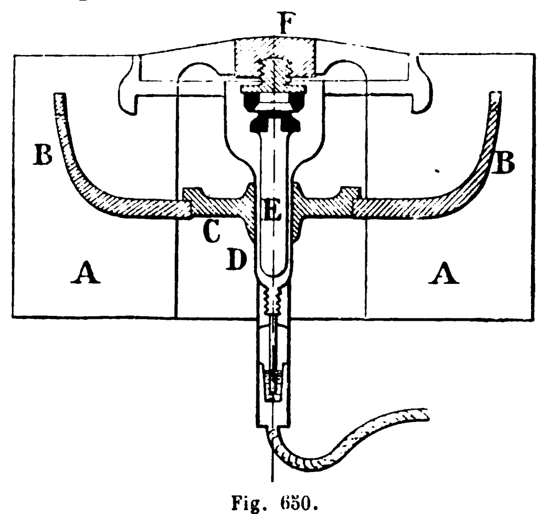


Fig. 650.

Ce morceau de fer est entouré de métal anti-magnétique de sorte que l'ensemble B C E F forme une portion de circuit magnétique qui pourra se fermer par le *frotteur*.

On remarque que le mercure du godet D est relié par un bouchon métallique et un autre contact à mercure avec le fil de la ligne.

Le frotteur est constitué par trois barres parallèles, en fer, sur lesquelles sont montés normalement des noyaux de fer avec enroulements tels que l'on ait la polarité Nord dans la barre centrale et la polarité Sud dans les deux autres. Ces bobines peuvent d'ailleurs être alimentées, en marche normale, par le courant de la station ou, en cas accidentel, et au départ, par une petite batterie de secours portée par la voiture.

Dès que l'aimantation se produit, un circuit magnétique est constitué comme l'indiquent les hâchures de la figure, et la cheville E, dont le poids est équilibré par la poussée mercurielle, se soulève pour raccourcir les lignes de force ; il en résulte un contact des deux charbons et le passage du courant dans les moteurs de la voiture par l'intermédiaire du mercure, du clou, des charbons, du cylindre F et du frotteur central.

Appareils divers pour le réglage, la commutation, etc. — Nous prendrons comme exemple une voiture équipée par la Compagnie de Fives-Lille (réseau d'Angers). Elle comprend :

1° Un coupe-circuit principal formé d'une boîte isolante dont le couvercle, muni d'une poignée, contient le plomb fusible.

2° Un commutateur qui permet de prendre l'un ou l'autre des moteurs ou les deux ensemble en quantité.

3° Un rhéostat en nickeline pour le freinage et le démarrage.

4° L'appareil Sprague. C'est un cylindre isolant, tournant autour de son axe et portant des pièces de cuivre convenablement découpées comme l'indique le développement (fig. 651). Le long d'une génératrice sont rangés dix balais qui appuient sur les plots du cylindre.

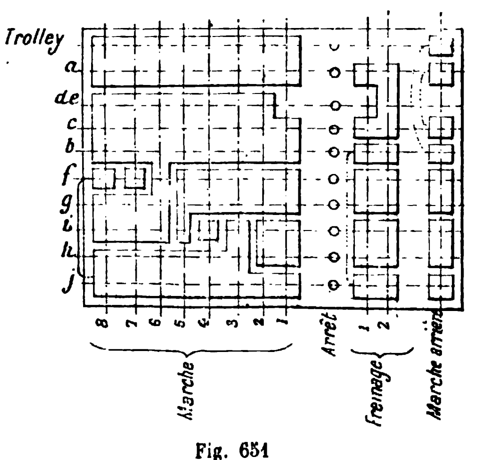


Fig. 651

Nous avons vu que les inducteurs sont partagés en trois sections : représentons ces portions en A, B, C (fig. 652); soit en R le rhéostat dont il vient d'être parlé et marquons

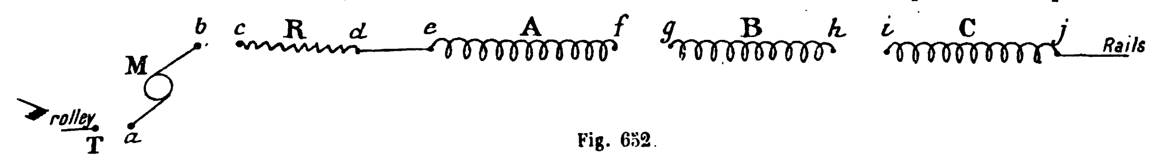


Fig. 652.

en M l'induit du ou des moteurs en service. L'extrémité *d* du rhéostat est unie à l'origine de la première section inductrice et le point *j* aux rails de retour ; les dix points

T, *a*, *b*, *c*, *de*, *f*, *g*, *h*. *i*, *j*

sont représentés chacun par un balai dans l'appareil Sprague.

1° Si l'on veut obtenir l'arrêt de la voiture, on amène devant les balais les touches de cuivre séparées, comme le montre le schéma ; les communications sont alors toutes coupées.

2° Pour la marche, il faut employer une ou plusieurs sections inductrices avec ou sans rhéostat : la position marquée 1 réunit, comme on le voit aisément

T et *a*, *b* et *c*, *f* et *g*, *i* et *h*

Les trois sections n'en forment qu'une et le rhéostat est mis en service.

Le mouvement du cylindre jusqu'au cran 2 ne change pas les connexions des portions de l'inducteur ; la seule différence est la réunion du point *d e* et de *b* et *c* : le rhéostat est mis en court-circuit.

On peut ainsi suivre les combinaisons jusqu'à 8 : on réunit alors (fig. 653) *h*, *j* et *f*

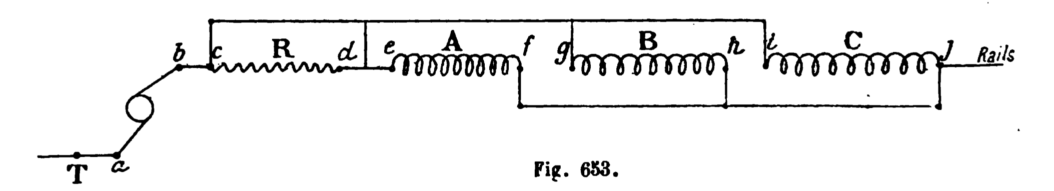


Fig. 653.

d'une part puis *g*, *i*, *b*, *c* et *d e* ; enfin *a* et T. De cette manière on a les trois sections inductrices en quantité et le tout est mis en tension avec l'induit du moteur.

3° Le freinage s'obtient par des bandes métalliques spéciales (fig. 651) : il y a deux positions différentes pour lesquelles la ligne est toujours séparée du circuit de la voiture.

En 1, *a* et *c* communiquent, *b* et *j* de même par un fil intérieur, puis *f*, *g* et *h* et *i*. On a alors l'ensemble représenté, figure 654 ; le moteur est fermé en court-circuit sur le rhéostat ; en tournant il se comporte comme une dynamo c'est-à-dire qu'il produit de l'électricité et le courant engendré s'oppose, d'après la loi de Lenz, à la continuation du mouvement. L'action de ce frein électrique est très puissante ; elle augmente encore si nous passons à la position 2 car alors la résistance R est mise hors circuit.

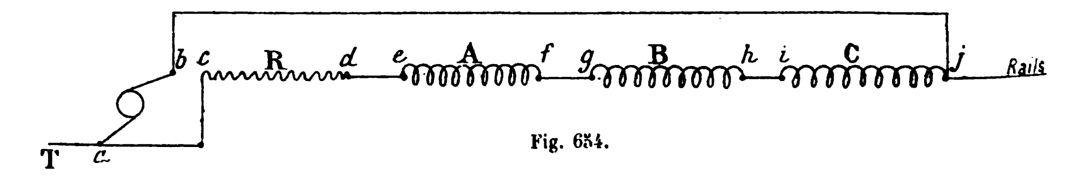


Fig. 654.

4° Quant à la marche en arrière, elle est due à un renversement des connexions entre l'induit et les inducteurs réunis en tension ; comme dans le freinage *a* et *c* communiquent, mais le trolley est réuni à *b* au lieu d'être isolé ; on a ainsi le schéma (fig. 655).

Chaque voiture possédant deux plates-formes, a deux appareils semblables mais, pour les deux, il existe une seule manette qui ne peut être retirée que dans la position d'arrêt ; toute fausse manœuvre se trouve ainsi évitée.

Fig. 655.

Il y a enfin un parafoudre constitué par une pile de rondelles métalliques séparées par des feuilles minces de mica et reliées la première au circuit principal, la dernière au sol ; le fil de terre est d'ailleurs muni d'un plomb fusible.

Dans le cas de voitures automotrices à accumulateurs, il faut en outre un commutateur spécial dit *coupleur série-parallèle* dont le rôle est de relier les deux moitiés de la batterie en tension ou en quantité ; lorsque la voiture comporte deux moteurs, ce qui a lieu ordinairement, le coupleur série-parallèle permet les combinaisons suivantes :

1° Les deux récepteurs en tension pour toute la batterie en tension également (démarrage et vitesse réduite) ;

2° Renversement du courant, en conservant les connexions précédentes (marche en arrière) ;

3° Mise des moteurs en parallèle sans modifier la disposition de la batterie (pour la vitesse de pleine marche) ;

4° Moteurs en parallèle avec la batterie en deux lignes parallèles. La tension aux bornes des moteurs est ainsi réduite de moitié (avarie des accumulateurs).

En outre des appareils purement électriques dont il vient d'être question, les voitures doivent être munies de freins (à main ou à air comprimé).

Tramways alimentés par courants triphasés. — On n'a utilisé les moteurs triphasés, que dans un nombre restreint de cas. Un des inconvénients réside dans l'obligation d'employer deux conducteurs et deux trolleys, le retour se faisant par les rails de roulement. L'économie du système est due surtout à la facilité de transformation du courant qui arrive de l'Usine sous une très haute tension et qui est ramené à un voltage modéré en des sous-stations échelonnées le long de la voie. Les moteurs employés sont à bagues ; ils permettent dès lors l'introduction de résistances dans l'induit pour le démarrage. Cette manœuvre est encore utilisée, pendant la marche, pour modifier la vitesse.

Avantages et inconvénients des tramways électriques. — On peut citer parmi les avantages :

1° Facilité de démarrage, freinage puissant (par utilisation de la loi de Lenz), renversement de marche facile ;

2° Remplacement du mouvement alternatif des divers moteurs mécaniques par un mouvement rotatif, absence de fumée et de vapeur ;

3° Elasticité d'exploitation très grande, si on compare la traction électrique à la traction animale, qualité très appréciée des compagnies de tramways ;

4° Economie dans cette exploitation : la traction animale revient à la *Compagnie générale des Omnibus de Paris* à 0^{fr},643 par voiture-kilomètre (ces voitures contiennent 50 places, comme on le sait). A Bruxelles le coût n'est que de 0^{fr},30 pour 30 places et à Chicago il atteint 0^{fr},80. Rapprochons de ces chiffres les prix d'estimation de la traction électrique par trolley : 0^{fr},15 à 0^{fr},35 par voiture-kilomètre pour 50 places. La traction par les autres moyens électriques est un peu plus onéreuse; on l'estime en chiffres ronds à 0^{fr},35 pour les voitures de la Compagnie des tramways de Paris.

Parmi les inconvénients on cite :

1° L'attaque des conduites d'eau et de gaz par électrolyse; un retour bien continu du courant au pôle — de la génératrice atténue cet inconvénient.

2° Quelques dangers : rupture d'un conducteur aérien, chute sur ce fil d'une ligne téléphonique, absence de retour des contacts superficiels à l'état de plots inactifs, communication électrique à la terre, etc.

Traction électrique des chemins de fer. — En principe elle ne diffère pas de la traction des tramways. Elle s'adresse seulement à des charges généralement plus importantes. Jusqu'ici la réalisation n'a pas été faite à de très longs tronçons de lignes.

La traction électrique des trains se fait au moyen de *locomotives* dont la disposition électrique reproduit celle des voitures automotrices examinées précédemment. Nous pouvons diviser ces locomotives en deux catégories d'abord :

1° Locomotives à accumulateurs ;

2° — à prise de courant,

Quant à la manière dont ce courant est reçu, nous pouvons distinguer :

a) l'emploi d'une ligne aérienne;

b) celui d'une ligne au niveau de la voie, rail conducteur généralement.

Les *locomotives à accumulateurs* exigent un poids considérable d'éléments secondaires. Généralement ces couples sont portés par un fourgon spécial que la locomotive remorque.

Citons, à titre d'exemple, le modèle exposé à Vincennes, en 1900, par la Compagnie du P.-L.-M. ; il est à trois essieux, l'un simplement porteur, les deux autres moteurs, attaqués directement chacun par un moteur de 300 chevaux.

Les accumulateurs forment deux séries de 96 éléments chacune et de capacité égale à 1.000 ampères-heure ; ils sont dans le fourgon spécial et leur poids atteint 30 tonnes environ. La locomotive elle-même porte deux batteries de neuf éléments, capacité 1.500 ampères-heure, destinées à actionner le moteur du compresseur d'air (pour le

frein Westinghouse, le sifflet, les appareils de mise en marche), à l'éclairage et à la marche lente, comme secours.

Le courant principal est établi, réglé et interrompu au moyen d'un grand rhéostat à liquide.

La marche en avant ou en arrière est obtenue par renversement du courant d'excitation ; cette manœuvre se fait par l'intermédiaire de commutateurs à air comprimé alimentés par le compresseur dont il a été question ; il en est de même d'ailleurs pour le fonctionnement du rhéostat de démarrage. La locomotive porte en outre des freins : pneumatique et à main, des appareils de mesure et de contrôle, un coupleur, un disjoncteur automatique coupant le courant en le ramenant à zéro si son intensité atteint 1.200 ampères.

Parmi les *locomotives à prise de courant*, nous signalerons celles de la *Compagnie d'Orléans* destinées à effectuer le trajet qui sépare les gares d'Austerlitz et du quai d'Orsay ; la prise du courant se fait au moyen d'un troisième rail isolé par des blocs de bois paraffiné, et placé en dehors de la voie. En certains points du parcours ces conducteurs deviennent d'ailleurs aériens. Pour capter l'électricité, on a muni la locomotive de deux frotteurs en avant, deux en arrière et un archet pour la prise aérienne quand il y a lieu. Ce courant, sous 550 volts, est distribué à quatre moteurs de 125 kilowatts, au moyen d'un coupleur série-parallèle ; chaque moteur attaque un essieu par un engrenage simple. La machine porte en outre un compresseur d'air actionné par un petit moteur spécial, un interrupteur principal à rupture brusque, un disjoncteur, les différents appareils de contrôle et de mesure, des freins.

Il convient de rappeler, en terminant, que la première application de la traction électrique aux chemins de fer est celle de la *Belt Line* à Baltimore ; elle a pour objet le passage du tunnel (longueur 4 kilomètres).

Rapprochons de ces locomotives le système mixte Heilmann essayé sur le réseau de l'*Ouest;* une machine à vapeur entraîne deux dynamos génératrices dont le courant est réparti entre huit moteurs attaquant chacun un essieu de la locomotive ; le mouvement est ainsi *rotatif* et permet d'augmenter la vitesse sans modification du matériel actuel.

Alimentation des lignes électriques étendues. — On a généralement recours, dans ce cas au procédé suivant : l'usine centrale engendre des courants triphasés sous haute tension ; ces courants sont reçus dans des sous-stations par des transformateurs statiques qui abaissent sa tension à 300 ou 400 volts puis une commutatrice fait passer ce courant à l'état continu sous le voltage ordinairement adopté pour la traction, soit 550 environ. Des batteries d'accumulateurs peuvent être mises en tampon, dans les sous-stations ; elles ont pour rôle de régulariser le courant et d'assurer le service momentanément en cas de rupture du circuit.

Cas particuliers de traction électrique. — Nous ne ferons qu'indiquer



les *transporteurs aériens*, chemins de fer de montagne, escaliers mobiles, plates-formes roulantes, etc., qui sont des applications de la traction électrique.

Les plates-formes roulantes, en particulier, ont fait leur apparition à l'Exposition de Chicago (1893). Elles sont constitués ordinairement par trois trottoirs formant un circuit fermé, l'un est fixe, le second est animé d'une certaine vitesse par des moteurs électriques disposés au-dessous, le troisième enfin se meut plus rapidement encore, de sorte que l'on peut passer sans danger du premier au second puis de là au troisième. La plate-forme roulante qui figurait à l'Exposition Universelle de 1900 recevait son mouvement de 120 électromoteurs de 5 chevaux chacun.

Pour terminer enfin signalons la traction électrique par *monorail*; le premier essai a été fait à Tervueren (Exposition de Bruxelles, 1897) par MM. Lartigue et Behr: le rail de roulement est unique et des fermes métalliques le supportent de distance en distance à une certaine hauteur au-dessus du sol. Cette charpente porte aussi quatre rails destinés à servir de guides à la voiture. Quatre moteurs électriques, prenant le courant par des balais frotteurs, actionnent la moitié des essieux. Dans le système *Langen*, appliqué sur la ligne de Barmen à Elberfeld et exposé à Vincennes en 1900, la voiture est *suspendue* à la voie qui est soutenue par des arceaux au-dessus de la rivière. La voiture, de 50 places, est à deux bogies à deux roues chacun et ces deux roues reçoivent leur mouvement d'un même moteur électrique (36 chevaux). Le courant est amené par un rail supplémentaire, recueilli par des frotteurs et il retourne à l'Usine par le rail de roulement.

DOUZIÈME PARTIE

TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE

CHAPITRE PREMIER

PRINCIPES DE LA TÉLÉGRAPHIE

Depuis longtemps on a songé à utiliser l'électricité pour les communications à distance. Plusieurs appareils ont été proposés, mais le premier réellement pratique date de 1832; il est dû à Morse.

Toute transmission télégraphique comprend :

1° Une *source* d'électricité ;

2° Une *ligne*, conducteur reliant les deux stations qui veulent correspondre ;

3° Un *transmetteur* destiné à envoyer dans la ligne le courant convenablement sectionné de façon à produire des signaux correspondant aux lettres, aux chiffres et aux indications diverses ;

4° Un *récepteur* qui enregistre les signaux envoyés par le premier poste.

Source d'électricité. — Jusqu'en ces dernières années on employait exclusivement les piles. En France, les modèles Callaud et Leclanché avaient la préférence. Aujourd'hui les bureaux importants sont pourvus de générateurs plus économiques et plus constants. Au bureau central de Paris le service est assuré par six batteries de 60 éléments d'accumulateurs, des systèmes Tudor et Laurent-Cély, chargés par dynamos.

On emploie encore des *piles sèches* de divers modèles qui ordinairement se rattachent au type Leclanché : elles comprennent en effet une solution de chlorhydrate généralement absorbée par une matière gélatineuse appropriée ; une lame de zinc amalgamée est placée dans ce mélange pâteux.

Aux Etats-Unis, on a même essayé d'employer des dynamos directement. Le

poste de Chicago comprend un ensemble de 21 machines entrainées par moteurs mécaniques spéciaux.

Quant aux bureaux d'importance secondaire, ils ont conservé leurs piles primaires ; on a essayé dans quelques-uns l'usage des accumulateurs chargés par des éléments au sulfate de cuivre.

L'intensité du courant nécessaire aux transmissions est peu considérable : le *courant d'action,* celui qu'on peut mesurer à la sortie de l'appareil expéditeur, est de 10 à 20 milli-ampères ; la fraction qui traverse le récepteur n'est que la moitié environ du courant d'action.

Ligne. — Lorsqu'il s'agit de communications entre les postes d'un continent, on peut adopter des lignes *aériennes* ou *souterraines*.

Les lignes aériennes sont constituées par du *fer galvanisé* ordinairement de 4 millimètres de diamètre. Elles sont soutenues par des cloches de porcelaine fixées à des poteaux en bois injecté ; les portées varient généralement de 40 à 200 mètres.

Quelquefois le fil de fer est remplacé par du bronze phosphoré dont la conductibilité est supérieure à celle du métal précédent.

Dans la traversée des villes, on fait usage de conducteurs souterrains formés de torons de fils de cuivre recouverts d'une épaisse couche de gutta et d'un guipage de jute et de coton. Souvent il y a plusieurs torons semblables isolés entre eux électriquement et réunis par une enveloppe de plomb (*câbles sous plomb)* ou par une armature de fils de fer enroulés en hélice (*fils armés*). L'ensemble se met soit en égout, soit en tunnel ou encore dans des tuyaux enfouis dans la terre.

Au point de départ de la ligne se trouve la source S dont le courant est envoyé par le transmetteur M, sorte d'interrupteur ; au second poste est placé le récepteur R (fig. 656). Supposons un circuit complet reliant les deux stations et appelons R la résistance électrique du fil d'aller ou du fil de retour ; la valeur totale de la résistance est alors 2R si nous négligeons, pour le moment, les bobines de l'appareil ; et le courant qui traverse le circuit a pour intensité

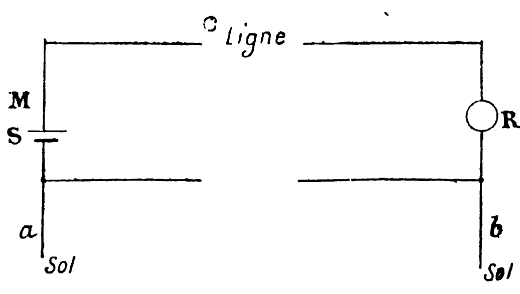


Fig. 656.

$$I = \frac{E}{2R},$$

si nous appelons E la f. é. m. de la pile.

Au lieu d'employer un fil de retour, on peut mettre le pôle — de la source en communication avec le sol et réunir l'autre à l'origine de la ligne ; le récepteur est placé entre le fil conducteur et la terre. De cette façon le sol joue le rôle d'un fil de retour, car on met les points a et b au même potentiel (qui est zéro) ; le courant se produit

alors en vertu de la différence de tension E entre les extrémités d'un fil de résistance R ; on a ainsi une intensité

$$I' = \frac{E}{R}$$

soit sensiblement le double de ce qu'on avait avec le fil de retour.

Influence de la capacité de la ligne. — Le conducteur qui relie les deux postes possède une certaine capacité électro-statique. Lorsque le courant y est lancé, l'électricité ne s'écoule pas de suite comme le veut la loi d'Ohm ; il y a une période d'état variable, plus ou moins longue suivant les dimensions du fil, pendant laquelle le conducteur se charge.

La première portion de l'électricité arrive à l'extrémité du fil alors que le conducteur n'est pas encore parvenu à son régime ; et, à mesure que la charge avance, la quantité d'électricité qui atteint le bout de la ligne devient de plus en plus considérable.

Ainsi la réception du courant est progressive : aux premiers instants de l'émission, l'intensité n'est pas perceptible, puis elle augmente d'une façon régulière jusqu'à une valeur normale. Cet effet est d'autant plus marqué que la capacité de la ligne est plus grande ; il dépend aussi de la résistance, et l'on a trouvé que la période variable est proportionnelle aux deux facteurs : capacité et résistance. Les deux augmentent d'autre part comme les longueurs, de sorte que finalement cet intervalle de temps varie comme le carré de la longueur de la ligne.

La figure 657 représente une courbe construite par lord Kelvin et donnant les intensités aux divers instants qui suivent l'émission du courant. Ce n'est qu'au bout du temps Oa que le régime normal est atteint. On a divisé, sur la figure, ce temps Oa en vingt parties que l'on a désignées chacune par α. Ainsi la valeur de α renseigne sur la durée de la période variable, car on sait que l'intervalle 20 α est nécessaire à l'éta-

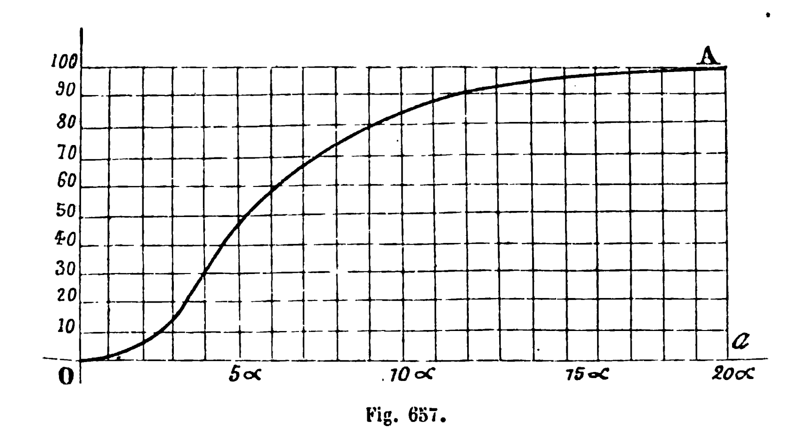


Fig. 657.



blissement du régime. Pour une ligne de 500 kilomètres en particulier, on a trouvé que $\alpha = 0,0006$; il faut donc un temps

$$t = 20 \times 0,0006 = 0,012 \text{ seconde.}$$

pour atteindre l'état permanent.

Les parties, transmetteur et récepteur, varient d'un appareil à un autre. Nous verrons seulement le principe des instruments les plus employés. Nous diviserons ces appareils en trois catégories :

1° Télégraphes à *signaux fugitifs* ;
2° — à *signaux enregistrés* ;
3° — *imprimeurs*.

CHAPITRE II

APPAREILS A INDICATIONS FUGITIVES

Cette classe comprend un certain nombre d'instruments parmi lesquels on peut citer l'appareil alphabétique de Bréguet, les télégraphes à aiguille, l'appareil ABC de Wheatstone.

Appareils à aiguille. — Le *manipulateur* consiste essentiellement en un interrupteur double qui permet d'envoyer dans la ligne des courants de sens variable.

On convient de remplacer les *traits* Morse par des courants d'un sens et les *points* par des émissions opposées. Dans ces conditions l'alphabet Morse peut être conservé.

Le *récepteur* est essentiellement formé d'un galvanoscope à aiguille apparente; les déviations ont lieu à droite ou à gauche suivant le sens du courant reçu. L'examen attentif de cette succession d'écarts permet donc de recevoir les diverses lettres, chiffres et signes. Au lieu de se borner à cette observation optique, on a eu l'idée d'employer deux petits timbres métalliques sur lesquels l'aiguille vient frapper ; les sons de ces pièces étant différents, l'employé peut percevoir les signaux *au son*.

Télégraphe alphabétique Wheatstone. — Le manipulateur consiste en une petite magnéto à manivelle possédant quatre bobines induites; une lame de fer tourne devant ces bobines, de sorte qu'il y a, par tour complet, quatre courants induits dans les enroulements.

Ce mouvement, communiqué à la manivelle, se transmet à une aiguille qui tourne sur un cadran divisé en trente parties (chaque point de division est marqué d'une lettre ou d'un signe). Chaque courant induit (par la rotation d'un quart de tour de manivelle) correspond à l'avancement de l'aiguille d'une division du cadran. Donc quand on tourne la manivelle de la petite magnéto, l'aiguille tourne sur le cadran et vient sucessivement se placer devant les diverses lettres ou chiffres ; il nous reste mainte-

nant à décrire le système qui permet à l'aiguille de s'arrêter devant le signe que l'on veut transmettre.

Pour cela on a disposé, à la circonférence du cadran, trente poulies équidistantes sur les gorges desquelles s'enroule une chaîne sans fin. Trente clefs manœuvrant chacune un levier coudé, et placées devant chacun des signes, permettent d'imprimer une dépression à la chaîne entre deux poulies consécutives. La tension de cette chaîne est d'ailleurs telle que deux clefs ne peuvent être enfoncées en même temps; l'abaissement de l'une entraîne forcément le relèvement des autres.

Le mouvement de la manivelle est communiqué à l'aiguille par un encliquetage dont le rochet fait corps avec l'axe de la manivelle et le cliquet avec l'axe de l'aiguille. L'abaissement d'une clef agit sur le cliquet et dégage le rochet qui continue seul son mouvement. L'aiguille reste alors sur le signe que l'on veut transmettre et les courants cessent de parcourir la ligne: le signal est donc transmis. Dès qu'on relève la clef l'embrayage se reproduit et provoque la rotation de l'index jusqu'à ce qu'on agisse sur une nouvelle clef pour un deuxième signal.

Le récepteur consiste essentiellement en un électro-aimant dont l'armature est polarisée par un fort aimant permanent.

Les courant alternés reçus par l'appareil provoquent un mouvement de va-et-vient de l'armature. Sur l'axe de rotation de cette pièce, un rochet à quinze dents reçoit les déplacements et avance d'une demi-dent par courant reçu soit d'un tour complet pour une rotation complète de l'index du manipulateur. L'arrêt d'ailleurs a lieu simultanément dans les deux appareils en raison de ce fait que le courant est interrompu dans la ligne dès que l'aiguille du manipulateur arrive devant le signal que l'on veut transmettre.

CHAPITRE III

TÉLÉGRAPHES A SIGNAUX ENREGISTRÉS

Télégraphe Morse. — Transmetteur. — Le transmetteur, ou manipulateur, se compose simplement d'un levier conducteur mobile autour d'un axe O qui communique d'une manière permanente avec la ligne (fig. 658).

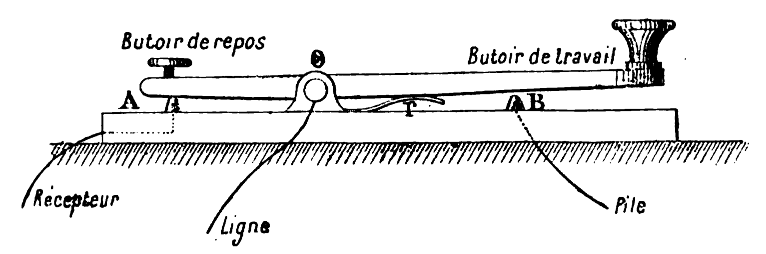


Fig. 658.

Au repos, le levier, pressé par un ressort *r*, appuie sur un butoir A relié au récepteur du poste. Dans cette position, l'appareil est donc disposé pour permettre au courant transmis par l'autre poste d'arriver au récepteur.

En agissant sur la manette, on met le levier en contact avec le butoir B communiquant avec le pôle + de la pile (en même temps la communication est coupée en A) et on envoie un courant dans le fil de la ligne ; le passage de l'électricité dure autant que le contact du levier sur la borne ; on emploie deux sortes de signaux qui diffèrent par la durée de l'émission : courants bref et prolongé. Ces deux signaux convenablement combinés suffisent à la constitution d'un alphabet, des chiffres et des signes divers.

Ordinairement le rythme adopté est le suivant :

Un courant bref.	un temps.
— prolongé. . . .	trois temps.
Séparation de deux signaux.	un temps.
— — lettres. .	trois temps.
— — mots . .	cinq temps.

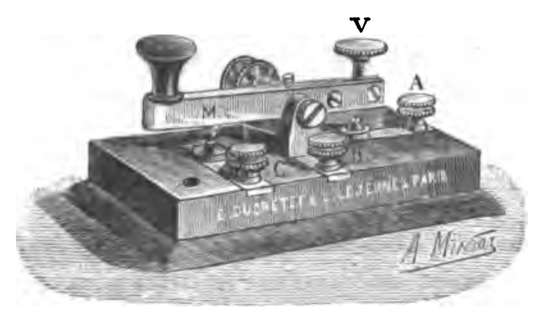


Fig. 659.

Récepteur Morse. — La pièce essentielle du récepteur est un électro-aimant A double (fig. 660) alimenté par le courant de la ligne ; son armature A' est une palette de fer doux fixée à un levier BC mobile autour de l'axe D. Deux butoirs E et F limitent la course de la pièce.

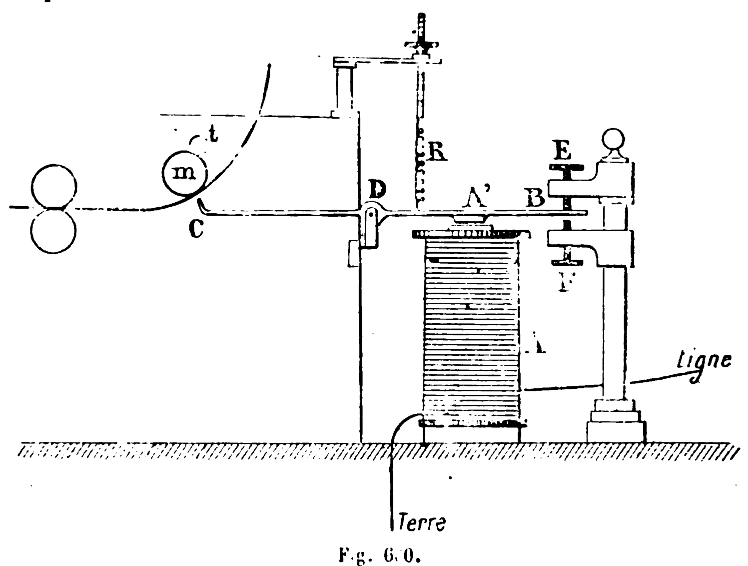


Fig. 660.

Quand le courant émis à l'autre station arrive à l'appareil, l'armature est attirée et l'extrémité C du levier vient s'appuyer sur une bande de papier déroulée d'une façon uniforme.

La pression doit du reste être assez légère pour permettre au mouvement de la bande de continuer. D'autre part le contact se maintient pendant toute la durée du

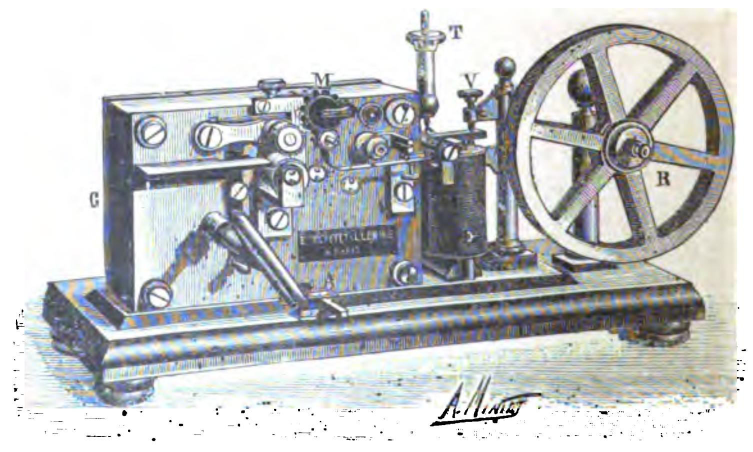


Fig. 661.

courant. Il en résulte qu'un signal bref donne un trait de longueur inappréciable, soit un *point*, tandis qu'une émission prolongée d'électricité produit un *trait* sur le papier. Au début, ce tracé était obtenu par une pointe sèche qui l'effectuait simplement en

creux sur le papier. Ce procédé, encore employé dans certains pays (Roumanie par exemple) est généralement remplacé par un tracé à l'encre grasse, produit par la pression du papier, au moment voulu, contre la molette *m* dont le contour est constamment encré par le tambour *t*.

La dépêche se présente donc à la réception sous la forme de barres et de points séparés par des intervalles, en petits groupes de 1 à 5 caractères ; chacun constitue soit une lettre, soit un chiffre ou un signe de ponctuation, une indication de service, etc.

Voici quels sont les signaux correspondant aux lettres :

a	- —	n	— -
â	- - - —	ñ	— — - — —
à *ou* á	- — — - —	o	— — —
b	— - - -	o	— - — -
c	- - - — -	p	- — - - -
ch	— — — —	q	— — - —
d	— - -	r	- — -
e		s	- - -
é	- - — - -	t	—
f	- - — -	u	- - —
g	— — -	ü	- - — —
h	- - - -	v	- - - —
i	- -	w	- - —
j	- - — —	x	- - - - —
k	— - —	y	— - — —
l	- - - - -	z	— — - -
m	— —		

Emploi d'un parleur. — Les chocs plus ou moins prolongés du levier mobile contre la molette permettent à une oreille exercée de distinguer un courant bref d'un courant long, et, par suite, de saisir la dépêche *au son*. Cette propriété a été utilisée dans l'emploi des *parleurs* ou *sounders*. Ce sont des électros à armatures plus pesantes se déplaçant à proximité d'un *abat-son*, boîte de résonance pour renforcer les sons.

Un employé traduit la dépêche et la dicte à un aide. Le procédé est plus rapide que la méthode ordinaire, mais il exige des électros plus puissants. Pour les alimenter, on fait généralement usage de relais et d'une pile locale, comme nous le verrons plus loin.

Ensemble de deux postes Morse correspondants. — La figure 662 donne le schéma de la disposition ; elle suppose que le poste (2) émet des signaux reçus au bureau (1). On voit que le levier manipulateur de (2) est en contact avec le butoir de travail ; le récepteur 2 est donc mis hors circuit et le courant de la pile de ce poste est lancé dans la ligne. En (1) le courant arrive à l'axe fixe du manipulateur ;

il gagne ensuite le récepteur, étant donnée la position de repos du levier, de sorte que l'on reçoit les signaux ; les flèches indiquent la direction du courant dans les diverses parties du circuit.

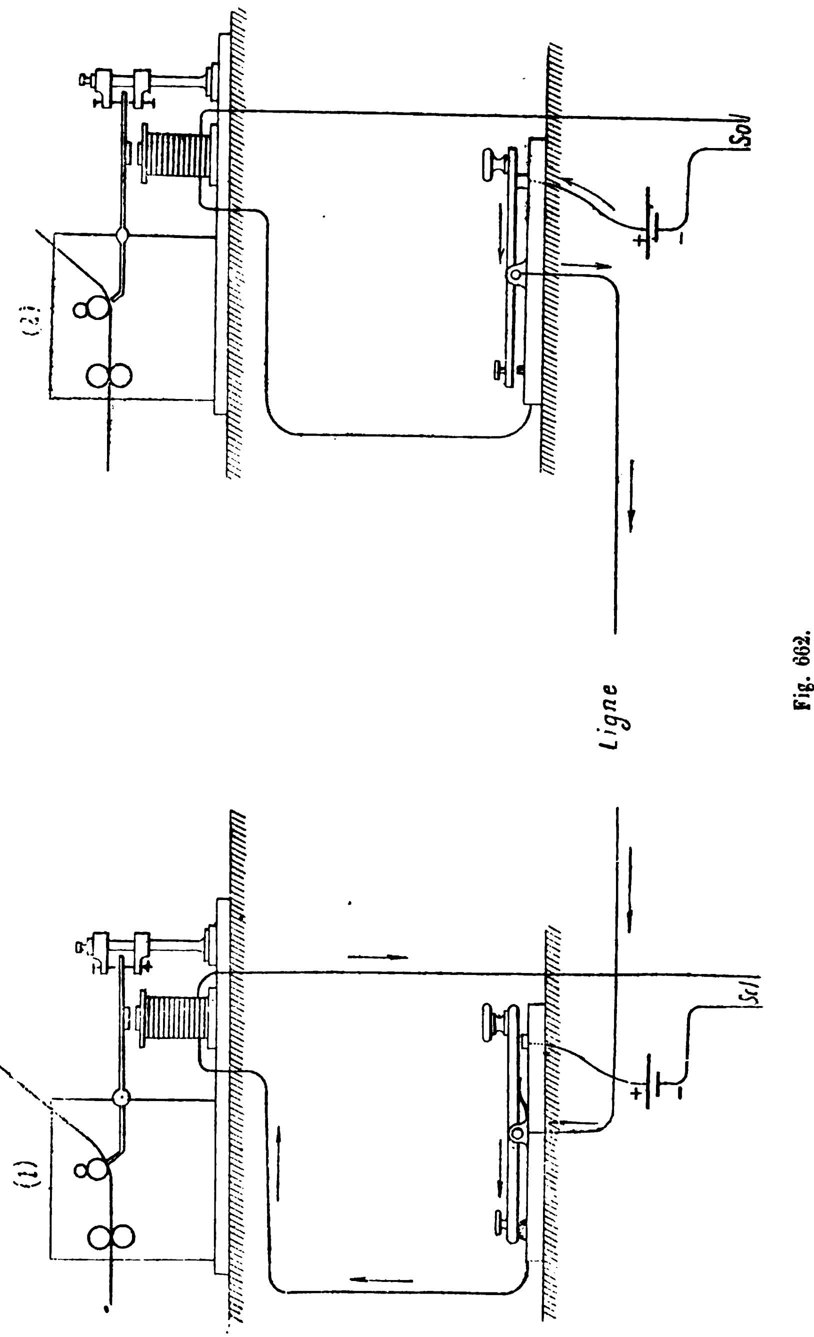


Fig. 662.

Le système Morse présente l'avantage d'être robuste et d'une grande simplicité.

Il a l'inconvénient d'exiger une double traduction : transformation des lettres en

signaux et ensuite des traits et des points en lettres. En outre, les transmissions sont lentes et le système ne saurait convenir sur les lignes à grand trafic.

Télégraphe Wheatstone. — C'est un appareil *à composition préalable* dont le fonctionnement comporte trois sortes d'opérations :

1° Composition de la dépêche ;

2° Transmission ;

3° Réception.

1° La *composition* se fait au moyen d'appareils nommés *perforateurs*. Ce sont des sortes d'emporte-pièces munis de trois pistons extérieurs sur lesquels agit l'employé : le premier produit les signaux correspondants aux points Morse, le second ceux qui équivalent aux traits, tandis que le troisième forme les blancs. Les deux sortes de signaux sont obtenus, par la disposition convenable de trous tels que 1, 2, 3, 4 (fig. 663). La rangée régulière de perforations médianes, plus petites, est faite en ou-

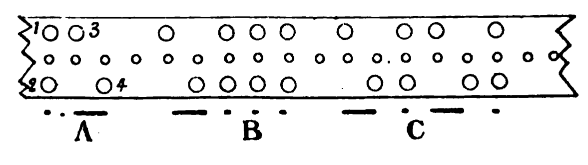


Fig. 663.

tre dans le but d'assurer la progression de la bande dans le perforateur et dans le transmetteur ; un point Morse est indiqué par les deux trous 1 et 2 en regard l'un de l'autre, un trait par des perforations obliques 3 et 4 formant un losange avec les deux petits trous correspondants.

2° Le *transmetteur* comprend une roue dentée qui entraîne la bande en agissant sur les trous centraux ; un balancier B bascule continuellement avec une grande vitesse et il porte deux goupilles *a* et *b* attaquant par dessus les deux leviers coudés *cde* et *hij* dont les tiges *c* et *h* appuient sur la bande de papier par l'action des deux ressorts *rr'*. Les tiges sont placées de manière à pouvoir pénétrer chacune dans une des lignes de perforations (fig. 664).

D'un autre côté les leviers articulés portent, par leurs extrémités, contre la tige *mn* mobile autour du point *o* en entraînant avec elle un commutateur dont les deux pièces métalliques M et M' sont munies chacune d'une goupille *p* et *q*. Ces goupilles sont reliées la première à l'origine de la ligne, la seconde à la terre. Selon la position du commutateur, (qui est d'ailleurs maintenue par un galet *r*) deux leviers *s* et *t* sont touchés différemment par les fiches *p* et *q*. Dans le cas de la figure, *s* s'appuie sur *p* et *t* sur *q* ; or chacune d'elles est en relation avec un des pôles de la source électrique ; il en résulte un courant dont le sens est figuré par les flèches. Cela suppose que la tige *h* rencontre un vide dans la bande de papier. Ce courant cesse bientôt et quand l'ai-

guille *c* peut traverser le papier à son tour, on provoque un courant opposé au premier.

Supposons que les deux perforations soient l'une devant l'autre (point Morse) les deux courants contraires se succèdent sans intervalle ; il s'écoule entre eux un temps appréciable lorsque les deux trous sont obliquement disposés (trait Morse).

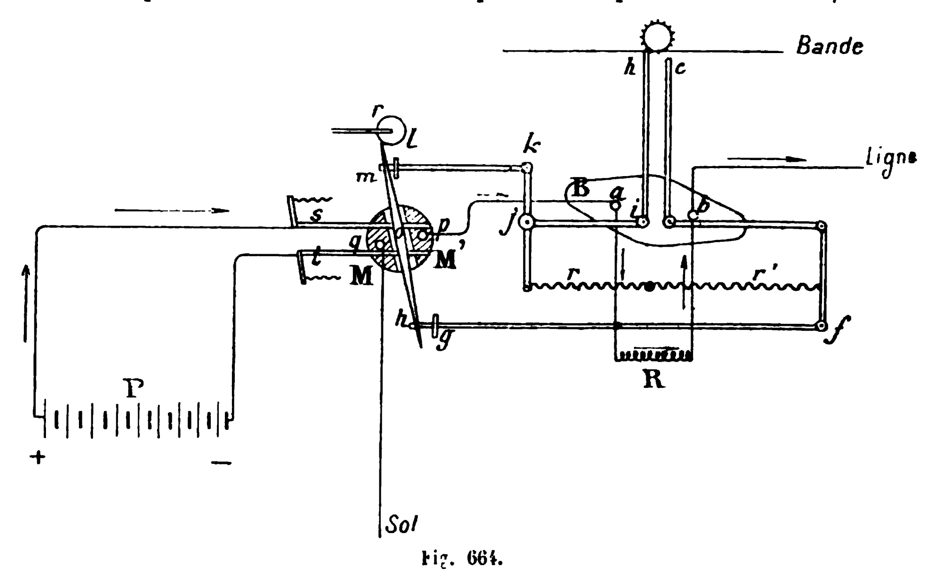


Fig. 664.

3° Le *récepteur* consiste en un électro-aimant double formé de deux noyaux et de bobines telles que AA', BB' (fig. 665). Entre les extrémités en regard de deux noyaux,

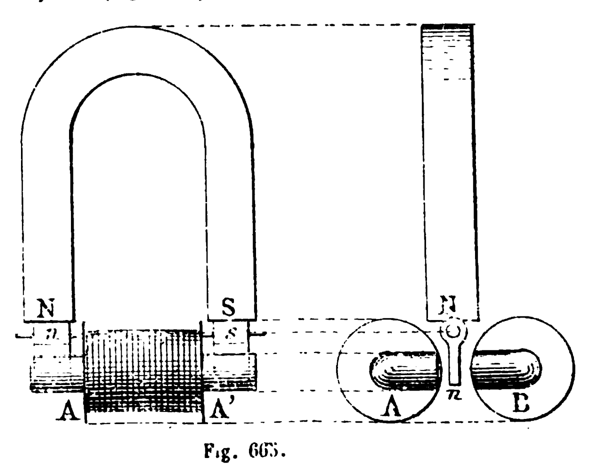


Fig. 665.

A et B par exemple, se déplace une palette formée des deux pièces solidaires *n* et *s* en fer doux et polarisées par l'aimant permanent NS. Quand aucun courant ne traverse les bobines, l'armature se tient en équilibre entre les deux noyaux ; mais supposons un courant émis; il parcourt les deux enroulements et développe, pour fixer les idées, un pôle Nord en B et un pôle Sud en A ; aussitôt la palette *n* se déplace à gauche vers

le pôle Sud. Les autres extrémités des électros produisent d'ailleurs un effet concordant avec le précédent.

Les mouvements de l'armature sont transmis, comme dans le récepteur Morse, à une molette qui appuie une bande de papier contre un tampon à encre grasse.

Cela posé supposons que nous voulions transmettre la lettre A (fig. 663) nous rencontrons d'abord un trou 1 dans lequel s'engage la tige h (fig. 664) d'où une émission de courant dans le sens représenté ; l'armature réceptrice se déplace alors et *commence* un trait sur la bande qui se déroule. Mais aussitôt en vertu du mouvement de bascule la tige c monte et vient s'engager dans le trou 2 situé en regard de 1 ; un courant opposé au premier en résulte d'où au récepteur un mouvement des palettes qui fait cesser la pression du papier contre la molette ; le trait est extrêmement court : c'est un point pratiquement.

La perforation 3 vient ensuite ; elle donne lieu à un courant identique au premier d'où une pression de la bande contre l'encre. Ce courant cesse aussitôt mais il se passe quelque temps avant qu'une nouvelle émission d'électricité ait lieu : le trou 4 en effet ne correspond pas à 3. Pendant ce temps l'armature *polarisée* reste appliquée contre les noyaux de fer (qui ne sont plus aimantés) par suite de l'attraction qui s'exerce entre un morceau de fer et un aimant. Le trait continue à se tracer : il est long. Il se termine quand la perforation 4 permet à la tige c de s'élever, et ainsi de suite. L'appareil inscrit donc les même signes que le télégraphe Morse primitif.

Son emploi est très rapide et les caractères sont bien nets.

On remarque sur la fig. 664 une résistance R, dite de *compensation*. Elle dépend de la capacité de la ligne et se trouve nécessitée par ce fait que les courants dus aux trous 1, 3, etc., chargent les conducteurs alors que les autres opposés provoquent la décharge. Or ces derniers, qui ne sont *jamais prolongés*, sont insuffisants à cette décharge. On doit donc affaiblir le premier courant tout en maintenant au second sa valeur. La résistance R insérée entre les goupilles a et b remplit ces conditions; au début l'électricité passe directement de a à b par les tiges $i\ j$, les ressort $r\ r'$ et $f\ e\ b$; cela permet d'actionner l'électro ; mais aussitôt les goupilles se séparent des leviers et le passage n'a lieu que par la résistance de compensation : il suffit à entretenir la charge jusqu'à la rupture du circuit par le commutateur.

CHAPITRE IV

TÉLÉGRAPHES IMPRIMEURS

Télégraphe Hughes.— C'est le seul que nous décrirons, sommairement d'ailleurs. Il ne comprend pas, comme les autres appareils, deux parties distinctes ; manipulateur et récepteur font corps ensemble.

En principe l'appareil que l'on trouve dans chaque poste comprend :

1° Un clavier de vingt-huit touches telles que T correspondant chacune à une lettre, à un chiffre ou à un signe quelconque. Ces touches, en s'abaissant, soulèvent des goujons G qui peuvent passer par une ouverture correspondante pratiquée dans la boîte B. Tous ces trous sont disposés suivant une circonférence (fig. 666).

2° Un mouvement d'horlogerie, manœuvré par un poids ordinairement, fait tourner avec une vitesse uniforme les arbres A et A'. Le premier porte en M un manchon constamment relevé par un ressort *r* et le levier *t* articulé en *o*. Un bras coudé *c* soutient

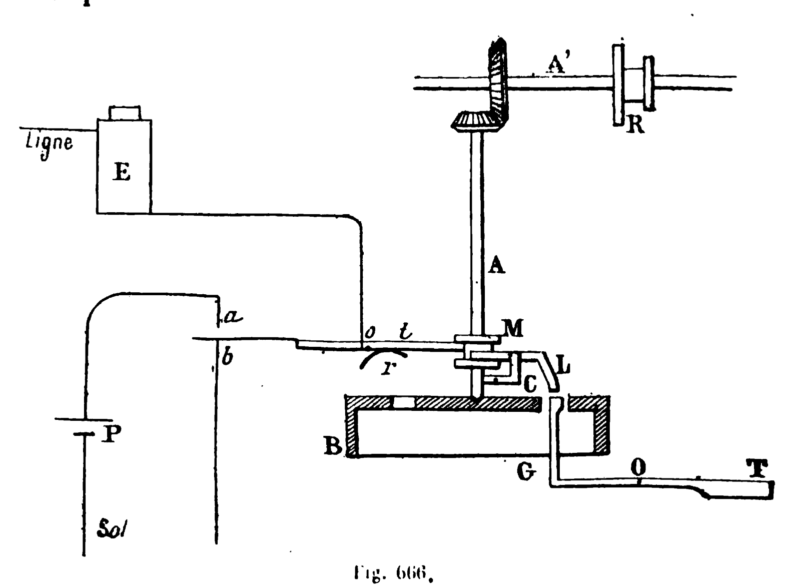


Fig. 666.

l'autre levier L qui peut agir sur le manchon pour le faire descendre si l'on vient à soulever l'extrémité L ; en même temps on voit que *t* vient toucher le contact *a*. Ordinairement *t* repose sur *b* et la ligne est mise, par l'intermédiaire du récepteur E et de *o* en communication avec la terre : le poste est disposé pour la réception.

Supposons que l'on veuille émettre une dépêche ; l'arbre A tourne et avec lui le manchon. Si l'on appuie sur une touche, le goujon soulevé frôle au passage le levier L, lequel bascule et fait descendre le manchon M en produisant le contact de *t* et de *a*. La pile envoie alors son courant dans la ligne à travers la bobine E.

Un ressort ramène automatiquement le goujon à sa première position dès qu'il a été abandonné par la pièce tournante L.

3° L'arbre A' porte une roue R dite *roue des types* qui présente sur son pourtour toutes les lettres, les chiffres et les signes, et la disposition est telle qu'un caractère donné se trouve à la partie inférieure de la roue à l'instant précis où le levier L vient en regard du goujon de ce caractère. Une roue et une came *de correction* ont pour rôle de maintenir rigoureusement uniforme la vitesse de la roue des types et par suite d'assurer le synchronisme entre les deux postes.

4° Dans tous les cas, que l'on transmette ou que l'on reçoive une dépêche, le courant passe toujours par l'électro E. Le rôle de cet électro est d'appliquer une bande de papier contre la roue des types et de produire ainsi, dans les appareils des deux postes, l'impression de la lettre ou du signe dont la touche a été déplacée.

Un levier dit *de rappel au blanc* permet après chaque communication d'arrêter la *roue des types* et la *roue de correction* en amenant le *blanc* sous la bande de papier.

Les télégraphes Hughes sont très rapides mais ils sont exposés à des dérangements assez fréquents, étant donnée la complication du mécanisme. On a dit que le moteur est un poids ; on doit le relever périodiquement soit au pied, soit par des moteurs hydrauliques ou électriques.

Bien d'autres appareils imprimeurs plus ou moins compliqués ont été imaginés ; on les désigne souvent sous le nom de *télescripteurs*.

Télégraphie multiple. — Les grandes lignes ne suffisent pas ordinairement au trafic si l'on emploie les appareils précédents, même les plus perfectionnés. On a imaginé différents moyens pour accélérer les communications. L'une des méthodes les plus employées consiste à faire usage d'une disposition mécanique permettant à plusieurs groupes formés d'un manipulateur et d'un récepteur de fonctionner ensemble sur la ligne. Théoriquement on admet qu'avec un appareil Hughes et un employé habile le conducteur n'est utilisé que pendant un dixième seulement du temps.

Les *distributeurs* comprennent, aux deux extrémités de la ligne, deux appareils semblables. Ce sont des commutateurs à 4, 5 ou 6 directions sur les plots desquels passe un bras tournant d'un mouvement uniforme et relié à la ligne. Chacun d'eux est en rapport avec un transmetteur. Au second poste les divers secteurs sont réunis aux récepteurs et les deux mouvements sont parfaitement synchrones. D'après cela, pendant



que le bras parcourt toute l'étendue des plots, un manipulateur donné est relié toujours une fois avec un même récepteur. Les communications peuvent donc s'établir entre ces groupes d'appareils sans se gêner mutuellement.

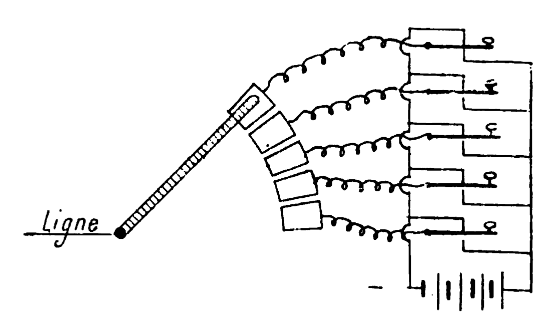


Fig. 667.

Les distributeurs peuvent se monter de bien des manières ; on peut, à ce sujet, diviser les appareils encore suivant la nature des signaux : *fugitifs*, *enregistrés* ou *imprimés*. On peut notamment obtenir le synchronisme des deux distributeurs au moyen d'électro-diapasons adaptés de diverses manières. Mais l'un des appareils les plus utilisés est le *Baudot*. Les signaux, au nombre de 31, sont obtenus par cinq émissions de courant, positives ou négatives, se succédant à des intervalles égaux et alternant dans un ordre différent pour chaque signal. Chaque transmetteur comporte donc cinq touches qui communiquent respectivement avec cinq plots consécutifs du distributeur. A l'arrivée, les récepteurs comprennent chacun cinq relais. On obtient ainsi des signaux qu'un appareil local nommé *traducteur* est chargé de convertir en *caractères imprimés*. Quant au distributeur proprement dit, il est entraîné soit par la chute d'un poids, soit par un moteur électrique avec *régulateur de vitesse* et *correcteur* pour maintenir un synchronisme parfait.

CHAPITRE V

POSTES ET LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES

Accessoires des postes. — On trouve comme pièces accessoires indispensables : des sonneries d'appel, des commutateurs divers, des relais, des indicateurs de courant, des parafoudres, des rappels, etc.

Les sonneries n'ont rien de particulier ; elles servent à annoncer aux agents l'émission d'une dépêche à destination du poste ou à demander la communication avec un autre bureau.

Toutes les lignes aboutissant à un poste possèdent une sonnerie. Dans les postes intermédiaires, chaque tronçon a son avertisseur de façon à indiquer de suite de quel côté vient l'appel.

Les commutateurs sont ou bien à manettes, comme ceux que l'on emploie pour la lumière ou pour les autres applications de l'électricité, ou *à fiches* comme ceux des boites de résistances.

Relais. — Il est possible que le courant du poste de départ soit insuffisant à la manœuvre du récepteur. Dans ce cas on l'utilise simplement pour déplacer une armature légère dont le rôle est de réunir une source locale au récepteur. On trouve souvent avantage à employer des électro-aimants polarisés. L'un des plus répandus, celui de Siemens, consiste en un électro double placé sur un aimant rectangulaire plié en équerre. Les extrémités supérieures des noyaux n sont des pôles Nord; la tige de fer mobile autour de l'axe x forme en s un pôle Sud. Donc en l'absence du courant, la palette se tient en équilibre (instable d'ailleurs) entre les deux noyaux.

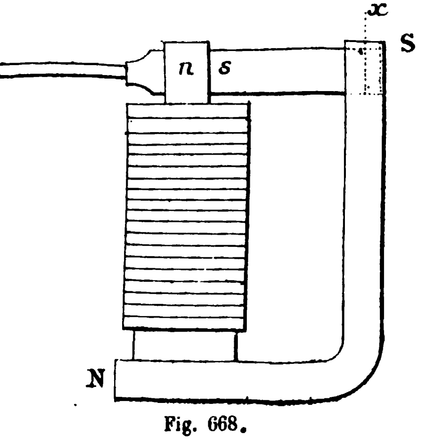


Fig. 668.

Deux courants opposés produisent des déplacements qui sont contraires. Si d'un

autre côté on limite la course de la palette en dehors de la position symétrique, il n'y a qu'un sens de courant capable d'agir sur la pièce mobile; l'autre sens n'a pour effet que d'appliquer plus fortement l'aiguille contre son butoir de repos.

Suivant le système de télégraphe employé, on comprend que l'une ou l'autre des deux dispositions puisse être adoptée. Le relais peut être double; il suffit pour cela de laisser à l'armature la liberté des mouvements dans les deux sens et d'établir de *chaque* côté un contact en relation avec un circuit local.

Indicateurs de courant. — Ce sont de petits galvanomètres ou plutôt des *galvanoscopes* sensibles, destinés à accuser le passage de l'électricité et à évaluer même ce courant. Supposons encore, par exemple, un bureau intermédiaire entre deux autres qui échangent une dépêche. L'agent de ce poste doit savoir si la communication est encore nécessaire ou s'il peut la couper; l'indicateur de courant le renseigne.

Parafoudres. — Les employés qui manient les appareils sont à peu près dans le cas de personnes qui toucheraient les fils de terre d'un paratonnerre.

Ils sont donc exposés (et cela sans parler des fils à lumière ou destinés au transport de force et aux tramways, qui peuvent accidentellement se trouver réunis aux conducteurs télégraphiques).

Pour mettre les agents et les instruments à l'abri des décharges, on place, à l'entrée des lignes dans les bureaux, des parafoudres. Ces appareils se font sur bien des modèles. L'un, très souvent adopté, consiste en deux plaques de cuivre montées sur un même support isolant et reliées l'une à l'extrémité de la ligne, l'autre au sol. Si l'électricité dépasse une certaine tension, elle traverse l'air sous forme d'étincelle et se rend directement à la terre sans aller aux appareils. Quelquefois le parafoudre comprend deux conducteurs isolés par du papier paraffiné; les courants normaux de la ligne ne sauraient franchir ce diélectrique tandis que les décharges atmosphériques le font avec facilité.

Installation des postes. — Quand plusieurs lignes convergent vers un bureau, on relie chacune d'elles à une barre verticale ABC ou D faisant partie d'un commutateur à fiches (*commutateur suisse*). Ces barres sont croisées par d'autres lames 1, 2, 3 et 4, bien isolées des premières et en communication chacune avec un appareil du poste (fig. 669).

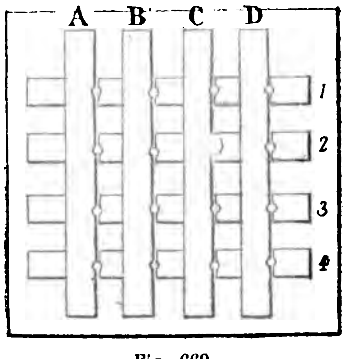


Fig. 669.

Au moyen de chevilles enfoncées dans les trous que l'on aperçoit sur la figure, on peut relier une quelconque des lignes à tel appareil que l'on veut (la communication est faite entre la ligne C et le télégraphe n° 2). Le parafoudre ordinairement est installé sur l'appareil précédent.

Le courant de la ligne à l'état de repos aboutit par le commutateur à deux directions C (et à manette, fig. 670) à la sonnerie S reliée elle-même au fil de terre. Dès

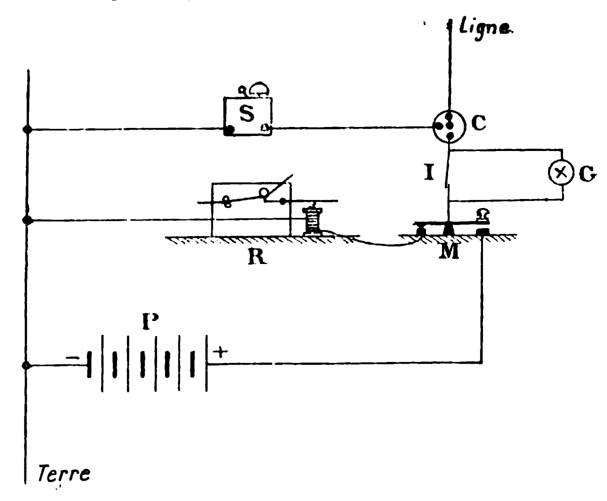


Fig. 670.

qu'un appel est entendu, on agit sur la manette de manière à mettre les deux appareils récepteurs M et R en communication avec le poste correspondant. Une clef I permet d'employer ou de supprimer le galvanoscope G.

Tableaux. — Généralement dans les bureaux où aboutissent un certain nombre de lignes, on fait usage de *tableaux* destinés à répartir le travail d'émission ou de réception sur les différents appareils.

Considérons seulement le cas de *lignes simples*, en nombre quelconque d'ailleurs. Ce tableau comporte :

1° des bornes doubles, en nombre égal à celui des appareils télégraphiques, et reliées aux bornes *pile* et *ligne* de ces instruments. De ces points d'attaches doubles du tableau partent des câbles souples terminés par des *fiches* destinées à établir la communication des appareils avec les diverses lignes.

2° des *annonciateurs*, un pour chaque ligne, indiquant le nom du poste qui demande la communication.

3° des *conjoncteurs* en nombre égal encore au nombre des lignes et destinés à recevoir les fiches dont il a été parlé.

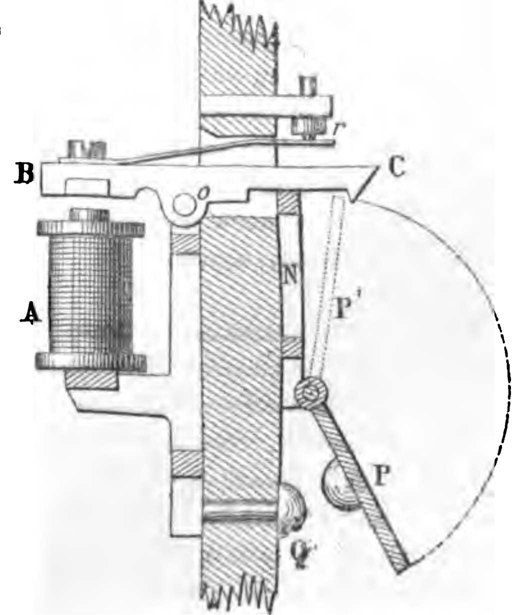


Fig. 671.

4° Des bornes reliées aux diverses piles locales des lignes.

Annonciateurs.—Ils consistent en un électro A recevant le courant de chaque ligne (fig.671); une armature horizontale B C mobile autour de l'axe *o* maintient, par son crochet C, le volet P dans la position P'. Dès que le courant passe dans le fil, l'armature, attirée en B, dégage le volet qui tombe en découvrant le nom ou le numéro du poste appelant

Conjoncteurs. — Chacun d'eux est formé de trois pièces métalliques 1, 2, 3 isolées l'une de l'autre (fig. 672). En temps ordinaire 1 et 2 communiquent électriquement grâce au petit piston *a* obéissant à l'action du ressort à boudin *r*.

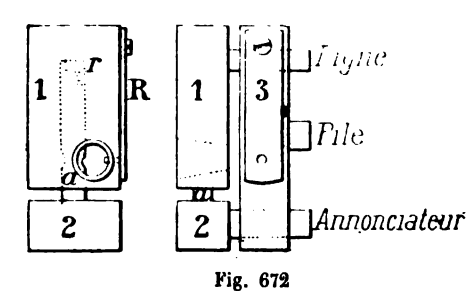


Fig. 672

La pièce 1 de chaque conjoncteur communique avec la ligne;

La pièce 3 avec la pile;

Enfin 2 est reliée à la bobine de l'*annonciateur* (l'autre extrémité de cette bobine étant à la terre).

Les deux parties 1 et 3 du conjoncteur sont percées d'une ouverture conique capable de recevoir une *fiche* formée de deux portions isolées électriquement: une *pointe* venant prendre contact avec le ressort R fixé à la pièce 3 et un *corps* qui touche le plot 1 en faisant remonter le piston *a* et en séparant par suite 1 et 2.

Voici dès lors quel est le fonctionnement de l'ensemble :

Si un poste envoie un courant dans la ligne, cette électricité passe de 1 à 2 puis par l'annonciateur et se rend à la terre; elle fait ainsi tomber le volet de l'annonciateur et démasque le nom du poste appelant. Cette chute du volet a pour résultat de fermer sur la sonnerie du poste, un circuit local de piles; cette sonnerie appelle l'attention de l'employé *dirigeur* qui voit d'où vient l'appel et qui enfonce dans le conjoncteur correspondant la fiche d'un appareil télégraphique libre. Cette manœuvre sépare les pièces 1 et 2 et réunit respectivement, par l'intermédiaire du cordon souple, la ligne et la terre aux bornes de même nom du récepteur. La séparation de 1 et de 2 retire du circuit la bobine de l'annonciateur.

Systèmes de communications. — Généralement deux postes importants, deux grandes villes, par exemple, communiquent directement entre eux, mais il faut en outre une ligne omnibus sectionnée en tous les bureaux intermédiaires.

La communication entre les deux postes principaux n'a rien de particulier à indiquer. Celle d'un bureau à un autre de la ligne demande une explication. Soient 1, 2, 3, 4... les bureaux; 2 veut correspondre avec 5; il y a dans chaque poste deux fils, les deux extrémités de la ligne sectionnée et chacun porte une sonnerie distincte et un commutateur permettant la liaison aux appareils. En 2 il y a donc l'extrémité 2 du tronçon 1-2 et l'extrémité 2 de 2-3; l'employé agit sur ce dernier et se fait entendre en 3 (fil 2-3). L'agent de ce poste, mis au courant de la demande, relie 2-3 à 3-4, de

sorte que 2 communique directement à 4; il demande de nouveau le poste 5; l'employé de 4 relie 3-4 à 4-5 et les deux correspondants sont mis ainsi en communication directe. Les contacts ne sont coupés que lorsque les galvanoscopes accusent la fin de la transmission.

Quand deux petits postes appartenant à deux lignes différentes veulent communiquer, il y a deux manières d'opérer: directement ou indirectement; le premier procédé consiste à demander au poste principal voisin la communication avec le poste principal auquel aboutit la ligne passant à la deuxième station. Là se complètent les contacts, de sorte, que l'on peut recevoir directement à la deuxième station les signaux émis à la première.

L'autre méthode consiste à transmettre la dépêche au bureau principal qui l'envoie lui-même au bureau principal correspondant. Là une nouvelle transmission se fait pour le poste de réception.

Télégraphie duplex. — Il s'agit de faire servir une même ligne aux communi-

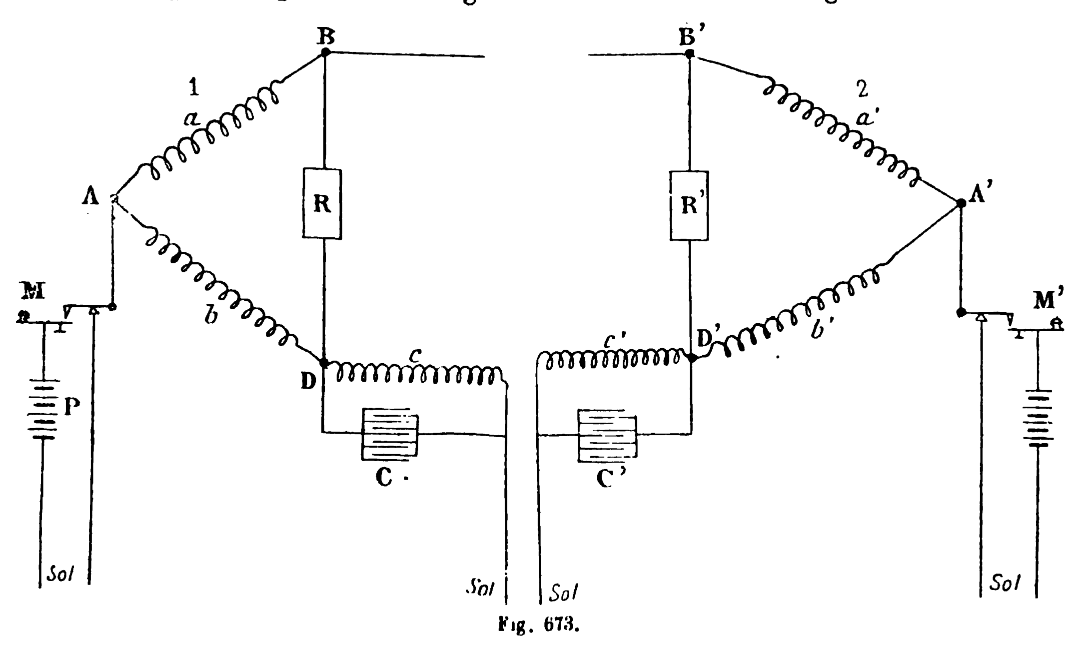


Fig. 673.

cations simultanées dans les deux sens. Plusieurs moyens sont employés à cet effet. L'un d'eux utilise un ensemble analogue à celui du pont de Wheatstone. En voici le principe :

En P est une source d'électricité qui peut envoyer son courant vers un point A au moyen d'un manipulateur M. En a, b et c sont disposées trois résistances réglées de manière qu'il y ait entre elles et la résistance l de la ligne (comprenant l'ensemble des conducteurs a' b' c') la relation

$$\frac{a}{b} = \frac{l}{c}$$

Si cette équation est applicable, nous savons (voir Pont de Wheatstone, page 298) que la branche BD ne reçoit aucun courant de la source P. L'électricité dans ce cas est envoyée au second poste et se répartit alors entre les diverses branches dérivées. Sur le fil BD est disposé le récepteur R du premier poste. On voit que cet appareil n'est pas influencé par les courants émis mais il est prêt à recevoir les communications venant de l'autre bureau (fig. 670).

Ces propriétés sont réciproques : deux agents peuvent être simultanément occupés à chaque poste, l'un à envoyer, l'autre à recevoir une dépêche, et cela au moyen du même fil.

On voit en C et en C′ deux condensateurs que l'on a placés pour équilibrer la capacité de la ligne.

CHAPITRE VI

TÉLÉGRAPHIE SOUS-MARINE

Influences perturbatrices. — Les influences qui gênent les communications sous-marines et qui empêchent d'employer, dans ce cas, les appareils ordinaires sont au nombre de deux : la *capacité de la ligne* et les *courants telluriques*.

La capacité d'une ligne sous-marine est considérable, étant donnée la disposition même des câbles employés. Ces conducteurs sont en cuivre et armés, à un ou plusieurs fils.

La partie centrale qui les contient est entourée de couches d'étoupes et de chanvre imprégnées de sulfate de cuivre. Tout autour on dispose l'armature de fer ou d'acier et chaque fil de ce métal est lui-même garni d'une enveloppe de chanvre goudronné.





Fig. 674.

La dimension et le nombre de ces fils dépendent des efforts présumés auxquels le câble doit être soumis.

En vertu de cette disposition, un câble sous-marin est un condensateur électrique ; son armature interne est le fil conducteur, l'armature externe se trouve formée par les garnitures métalliques et par l'eau de mer. D'après cela il faut, pour charger un te câble, une grande quantité d'électricité et par suite un temps considérable ; la décharge après le signal, exige un temps de durée comparable de sorte que les transmissions sont très lentes. Si on tend à accélérer les opérations, les signaux reçus manquent de netteté. Nous avons vu (page 659) l'influence de la capacité des lignes et nous savons que l'intensité du courant reçu varie avec le temps comme les ordonnées de la

courbe (fig. 657). Si l'on prend comme exemple le câble qui relie l'Irlande à Terre-Neuve (5.000 kilomètres environ) on trouve que

$$\alpha = 0,2 \text{ seconde}$$

Il faut donc un temps

$$t = 20\,\alpha = 20 \times 0,2 = 4 \text{ secondes}$$

pour que le signal émis arrive complètement à destination, capable d'agir sur un électro Morse. S'il en est ainsi, chaque signal, charge et décharge, exige deux fois quatre secondes, soit huit secondes et une lettre, formée en moyenne de trois signes, demande un temps égal à vingt-quatre secondes. Avec une telle lenteur, moins de trois lettres par minute, le câble ne pourrait pas suffire au service.

En outre il y a les *courants telluriques* qui circulent constamment d'un point à un autre de la terre et qui empruntent le câble. Ces courants sont souvent intenses. Nous verrons comment on les combat.

Emploi d'un galvanomètre comme récepteur. — On remplace ordinairement le récepteur télégraphique par un galvanomètre sensible. Considérons la courbe de lord Kelvin (fig. 657) et supposons que l'on émette successivement deux courants opposés dans la ligne ; le premier dure un temps $5\,\alpha$; il donne une intensite figurée à chaque instant par A (fig. 675). A partir de cet instant, on arrête le courant; l'intensité commence à décroître et sa valeur à un moment donné, s'obtient en retranchant des ordonnées de la courbe A celles d'un tracé A' qui n'est que la reproduction de A

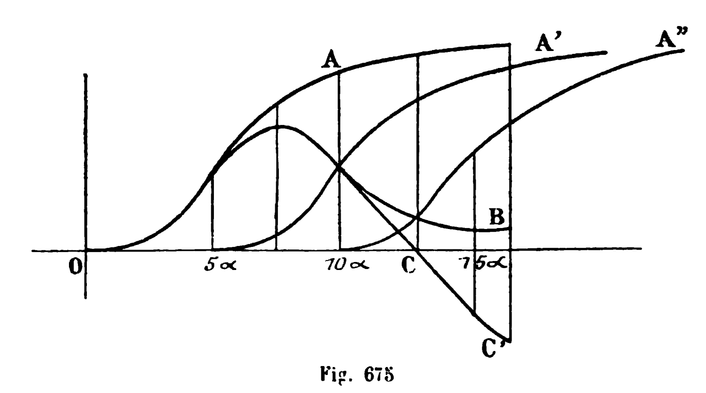


Fig. 675

déplacée de O en $5\,\alpha$; soit B la courbe nouvelle valable à partir du point $5\,\alpha$. Au bout d'un temps $10\,\alpha$, nous émettons un courant opposé au premier ; son effet est de soustraire des ordonnées de B des valeurs égales aux ordonnées de A" (A déplacée de O en $10\,\alpha$). On construit ainsi la courbe C. On voit donc que ces deux émissions successives produisent, dans le galvanomètre, des effets opposés : déplacements de la partie mobile à droite et à gauche.

Au lieu de deux courants inverses supposons deux émissions de même sens. A

l'époque 10α commence la seconde et il faut ajouter aux ordonnées de B celles de A", ce qui donne le tracé D (fig. 676 où l'on a conservé les notations de la précédente).

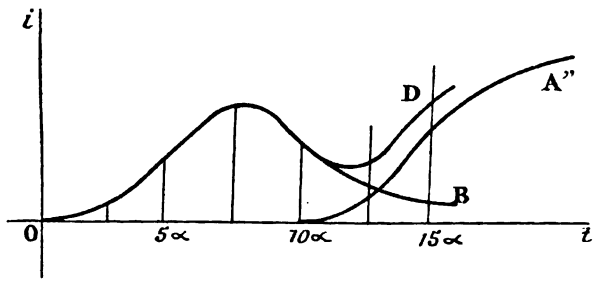


Fig. 676.

Ainsi en résumé tous les courants émis se traduisent par des élongations à droite ou à gauche du zéro du galvanomètre. On convient par exemple de remplacer les traits du code Morse par les premières et les points par les secondes.

Jusqu'à une certaine limite les effets gagnent en netteté si on diminue l'intensité des courants.

Siphon enregistreur (Siphon recorder). — L'observation continuelle d'un galvanomètre à miroir dans une chambre obscure est une opération très pénible et de plus il ne reste aucune trace matérielle de la dépêche reçue. Aussi cet appareil primitive-

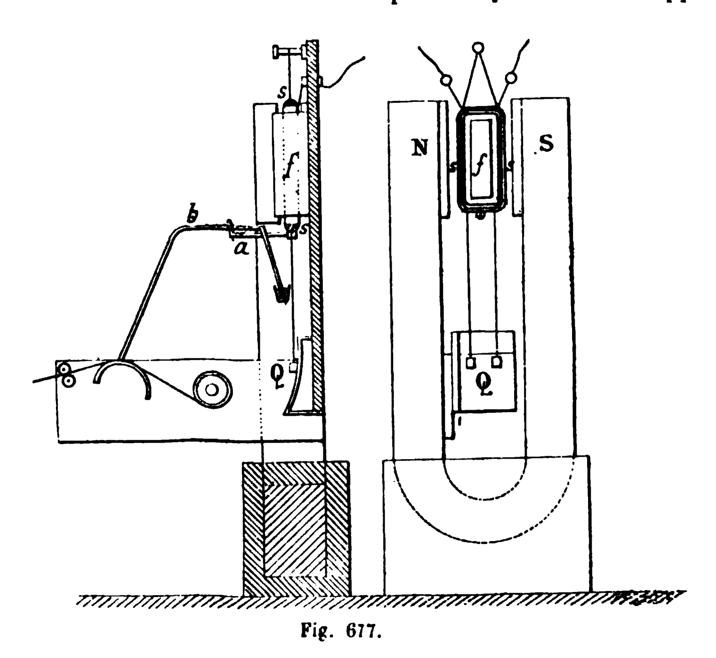


Fig. 677.

ment adopté a-t-il été remplacé par le *siphon recorder* de lord Kelvin. Voici quelles sont ses parties essentielles :

1° Le *manipulateur* est une clé Morse double ; les deux lames élastiques communiquent l'une avec la ligne, l'autre avec la terre. D'autre part, elles prennent contact :

a) dans leur *position de repos*, toutes deux avec le pôle — de la pile ;

b) quand on les presse, *position de travail*, avec le pôle +.

Il résulte de cela que, dans la position de repos, la ligne est à la terre ; quand on agit sur le levier *ligne*, un courant positif est envoyé dans la ligne ; si au contraire, on appuie sur le lame *terre* ; le courant envoyé est négatif.

Entre les deux branches N et S d'un fort aimant permanent ou d'un électro-aimant alimenté par une pile locale, se trouve la bobine rectangulaire mobile *f* du galvanomètre. Elle est à fil fin et suspendue par deux brins de cocon à un support fixe. A son intérieur se voit un tambour de fer doux, comme dans le galvanomètre Deprez-d'Arsonval. Le cadre est maintenu dans une position d'équilibre au moyen de deux poids Q glissant sur une surface concave ou encore par la tension d'un ressort, mais suivant le sens des courants reçus, il se meut à droite ou à gauche; ces déplacements fort petits, sont amplifiés au moyen d'un index d'aluminium *a* qui entraîne lui-même un siphon léger *b* plongeant par sa petite branche dans un godet plein d'encre et se terminant de l'autre côté à proximité d'une bande de papier déroulée d'une manière continue. Quelquefois l'encre, au lieu de s'écouler naturellement par la pointe effilée du siphon, est électrisée, dans son godet, par une petite machine (*replenisher*) ; elle est alors crachée en gouttelettes sur le papier. En l'absence de courant, le trait obtenu est rectiligne; si une dépêche est reçue par le poste, le tracé est sinueux. Voici ce qu'on obtient pour les premières lettres de l'alphabet (on a placé en regard des lettres les signaux du récepteur Morse).

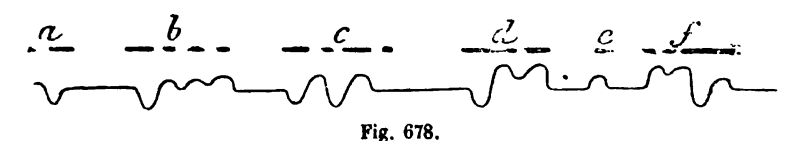


Fig. 678.

Enregistreur Ader. — Le siphon recorder ne donne des signaux parfaitement nets que pour une vitesse déterminée de transmission, et cette rapidité n'est pas toujours jugée suffisante.

M. Ader a imaginé, pour éviter ces reproches, un récepteur d'un nouveau genre : entre les branches d'un aimant se tient un fil conducteur de 2/100 millimètre de diamètre parcouru par le courant de la ligne et tendu à l'une de ses extrémités par un petit dynamomètre. Le fil, maintenu aux deux bouts, tend à se déplacer en avant ou en arrière, selon le sens du courant reçu. On enregistre les oscillations du petit fil au moyen de la photographie et la bande impressionnée passe aux bains révélateur et fixateur avant d'être examinée.

Emploi de condensateurs. — Pour combattre les courants telluriques, on interpose sur le câble, à ses deux extrémités, des condensateurs de capacité en rapport



avec celle de la ligne. Ces coupures empêchent les courants telluriques de se propager; les condensateurs ne font que se charger et ce sont les variations produites par les courants émis qui engendrent, dans les armatures opposées, les quantités d'*électricité nécessaires* aux signaux. Ainsi, par exemple, soit un courant dirigé vers le condensateur du poste transmetteur; l'armature *a* (fig. 679) se charge positivement et attire sur *b* l'électricité — en même temps que *b'* devient positif; il résulte de là une charge — de *a'*, ce qui engendre un déplacement d'électricité positive, c'est-à-dire un courant descendant; une émission inverse au premier poste produirait un courant contraire à l'arrivée.

On a remarqué que l'emploi de ces condensateurs (dus à M. Varley) donne aux signaux une plus grande netteté.

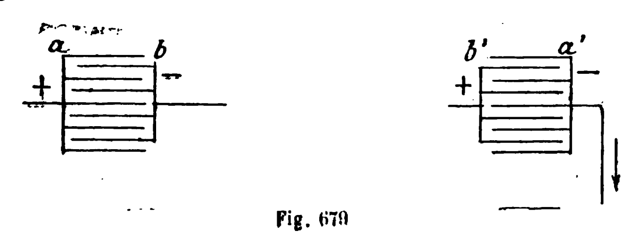


Fig. 679

On voit (fig. 680) la disposition schématique des deux postes. Le commutateur C permet à volonté de mettre en service le galvanomètre récepteur G ou le manipulateur M avec sa pile. Dans ce dernier cas, le commutateur inverseur M tient lieu de transmetteur et il permet d'envoyer des courants dans les deux sens.

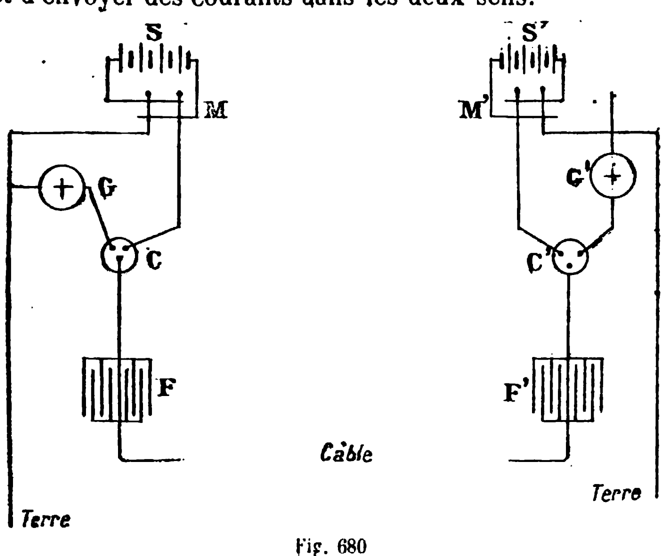


Fig. 680

Avec l'appareil Kelvin et Varley on arrive à expédier par minute une vingtaine de mots sur les longs câbles. On augmente encore le trafic par l'emploi de la disposition en duplex, qui nécessite d'ailleurs quelques précautions spéciales.

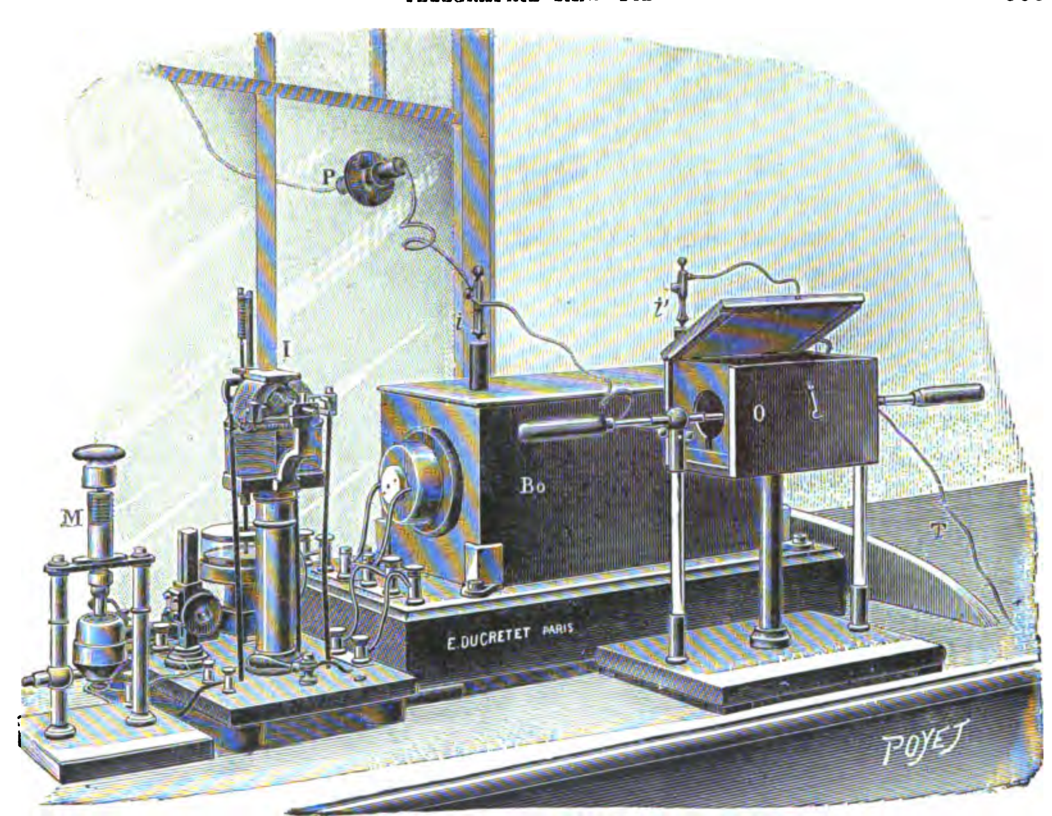


Fig. 681

Récepteur. — Nous en avons vu le principe; pour recevoir les signaux, on forme une sorte de chaîne conductrice au moyen d'un fil partant de l'extrémité supérieure d'un mât et du radio-conducteur que l'on réunit à la terre par l'électrode opposée à celle qui est reliée au mât. Ce tube à limaille fait également partie d'un autre circuit comprenant encore quelques éléments de pile et un relais sensible. En temps normal le courant des piles ne traverse pas le tube à limaille, lequel est mauvais conducteur; mais dès que les ondes électriques sont collectées, le courant devient capable d'actionner le relais R; cette pièce ferme alors le courant d'une pile locale:

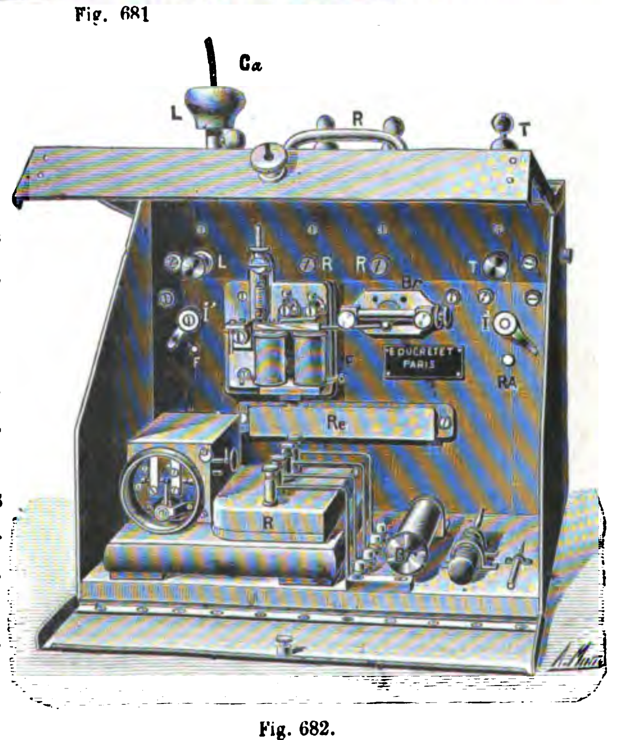


Fig. 682.

1° à travers les appareils inscripteurs ; (genre Morse, par exemple).

2° à travers un *frappeur* F à trembleur comme les sonneries, agissant sur le tube à limaille (fig. 682.)

Cet ébranlement ramène, comme nous le savons, le tube à son état premier et le rend propre à recevoir un nouveau signal.

Les deux espèces de signaux sont ainsi reçues : une émission brève produit un très petit nombre de vibrations du trembleur et par suite, si on fait usage de l'inscription Morse, une succession de points très peu écartés sur la bande de papier ; au contraire une émission *longue* donne une longue file de points soit un *trait*. Les signaux sont donc ainsi très différents les uns des autres et, en les combinant d'après l'alphabet Morse, on a la possibilité de transmettre les lettres, les chiffres et les signes.

Les chocs du marteau qui accompagnent la réception sont d'ailleurs facilement perceptibles et permettent de recevoir la dépêche *au son*: un roulement *court* remplace le point Morse ; le roulement *prolongé* équivaut au trait.

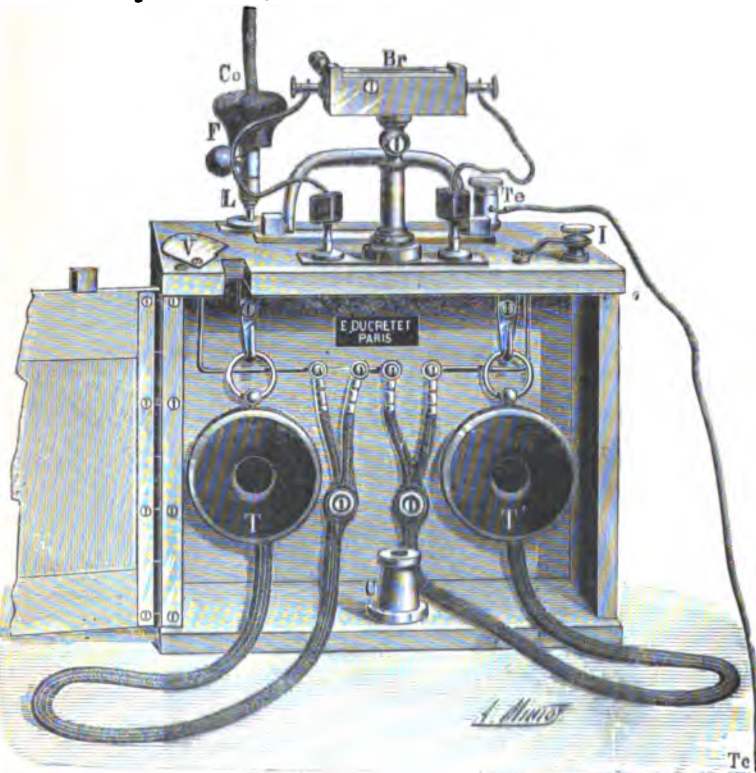


Fig. 683.

Au lieu de faire usage d'un relais et d'un récepteur télégraphique, M. Popoff a eu l'idée d'employer un récepteur *téléphonique* (voir plus loin *Téléphonie*) et grâce à une modification du radioconducteur, il a pu supprimer dans ce cas le frappeur, de sorte qu'il suffit alors de brancher sur les extrémités du tube deux récepteurs de téléphone, en tension, et une petite pile locale, pour recevoir les signaux (ils se traduisent par des roulements *courts* ou *prolongés* très perceptibles). L'ensemble forme un récepteur *radio-téléphonique*). (fig. 683.)

Les appareils de télégraphie sans fil fonctionnent dès maintenant d'une façon certaine jusqu'à des distances de 800 kilomètres. Le projet de ligne transsaharienne entre Gabès et le lac Tchad, actuellement à l'étude, comporte un trajet de 3000 kilomètres environ avec postes intermédiaires.

TREIZIÈME PARTIE

TÉLÉPHONIE

CHAPITRE PREMIER

TÉLÉPHONES MAGNÉTIQUES. — RÉCEPTEURS.

Objet de la téléphonie. — Il s'agit de transmettre le son à distance ; or nous savons que le son est le résultat des vibrations des corps ; le problème revient donc à un transport d'énergie mécanique à distance. Seulement ici la question de rendement importe peu ; ce que l'on veut, c'est une répétition fidèle au second poste des sons émis au premier. Or nous savons que le son est caractérisé par trois qualités : sa hauteur, son intensité et son timbre :

1° La hauteur dépend du nombre des vibrations par unité de temps ;

2° L'intensité est donnée par l'amplitude des déplacements ;

3° Enfin le timbre s'explique par la coexistence du son fondamental et de ses harmoniques [1]. C'est lui qui fait reconnaître deux sons de hauteur et d'intensité égales, mais dont l'origine n'est pas la même.

Dans les appareils téléphoniques on doit, autant que possible, ne pas altérer ces trois qualités, au moins la hauteur et le timbre, si on veut que la voix soit reconnaissable. Cette transmission exige, comme la télégraphie, deux appareils distincts : un *transmetteur* et un *récepteur*. Nous allons examiner d'abord un appareil complet d'un genre particulier (sans source d'électricité, c'est-à-dire purement *magnétique*). Cet appareil se compose de deux parties identiques, transmetteur et récep-

1. Les harmoniques sont des sons dont les hauteurs sont doubles, triples, quadruples, etc. de celle du son fondamental.



teur, — c'est un *téléphone magnétique*. L'un de ces postes, plus ou moins modifié sert *toujours de récepteur* quelle que soit la nature du transmetteur utilisé. Nous aurons donc fait, dans ce chapitre, en même temps que l'étude des téléphones magnétiques, celle de tous les récepteurs possibles.

Voyons comme type des appareils magnétiques, le premier que l'on ait construit, celui de Bell.

Téléphone Bell. — Il date de 1876, et a ses deux parties identiques, transmetteur et récepteur, réunies électriquement par une ligne ordinairement à double fil.

Considérons l'une des parties : elle est constituée par une boîte *f* en bois ou en ébonite munie d'un prolongement *d* servant de manche et d'un cornet *e* évasé destiné à recevoir les sons confiés au téléphone. La boîte loge une plaque *c* en fer assez mince, tenue par son pourtour et une bobine *b* de fil fin. Cette bobine est traversée par un aimant *m* dont l'extrémité se trouve à une petite distance de la lame vibrante. On

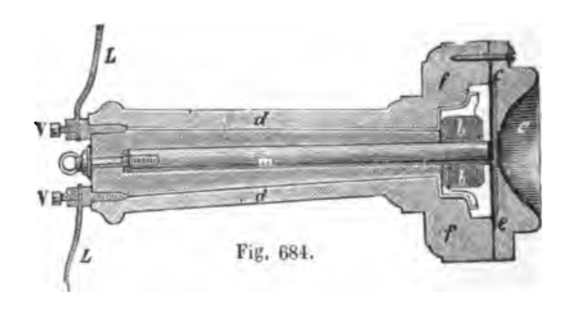


Fig. 684.

peut d'ailleurs, en agissant sur l'autre bout du barreau, modifier cet intervalle. On voit en V V les extrémités de la bobine ; c'est de là que part la ligne. L'aimant et la pièce de fer doux constituent un champ magnétique dont la disposition n'est pas absolument constante ; elle dépend en effet de la distance qui sépare le pôle d'aimant et la lamelle ; or cette distance varie quand la plaque se déplace c'est-à-dire quand elle vibre sous l'influence des sons émis dans le cornet. A chaque vibration correspond une modification du champ et, par suite, un phénomène d'induction ; les divers courants ainsi engendrés sont transmis par la ligne au poste récepteur. L'appareil placé dans ce second lieu joue un rôle réciproque de celui du transmetteur et il parle sous l'action des courants reçus ; mais l'explication du phénomène n'est pas aussi simple qu'elle le paraît à première vue : on pourrait croire que l'effet unique des courants induits est de modifier l'aimantation du barreau et d'attirer plus ou moins, par suite, la lame de fer formant armature ; ce seraient alors les vibrations transversales de l'ensemble de la lame qui produiraient le son. En réalité cet effet, s'il existe, n'est pas suffisant pour l'explication du phénomène, car des plaques très épaisses peuvent être employées, et il est difficile alors d'admettre une telle vibration. La cause de la transmission réside plutôt dans le phénomène de Page : production d'un son par les variations dans le magnétisme du fer comme conséquence sans

doute des changements d'orientation des particules magnétiques. Quant aux vibrations d'ensemble, elles renforcent probablement les sons produits, au moins quand les dimensions : diamètre et épaisseur, sont convenablement choisies.

Ainsi chaque vibration composant le son complexe émis devant le transmetteur est représentée à la réception, et l'ensemble est plus ou moins bien reconstitué.

Pour transmettre les sons à distance par cet appareil, la disposition est extrêmement simple : deux fils relient les deux bornes du premier téléphone à celles du second.

Récepteur Ader. — Le modèle précédent a été modifié de différentes manières : au lieu d'utiliser un seul pôle de l'aimant, on peut faire servir les deux extrémités : le barreau est alors replié en anneau et chaque bout est garni d'une bobine. C'est sur ce principe que reposent actuellement la plupart des téléphones de cette catégorie ; une des formes les plus répandues est celle d'Ader : l'aimant en forme de cercle constitue une poignée pour l'instrument. Aux deux extrémités sont fixées des équerres de fer doux formant les noyaux des deux bobines. Sur l'aimant se trouve également vissé le boîtier en laiton, sur les bords duquel repose la lame de fer vibrante. Le couvercle qui se visse par dessus porte un anneau excitateur, en fer, qui a pour effet de modifier d'une façon avantageuse le champ magnétique. Sans lui les lignes de force se dirigent d'un pôle sur l'autre directement ; grâce à l'anneau qui se polarise, les lignes se redressent et traversent à peu près normalement la lame de fer : dans le transmetteur, les courants induits engendrés sont plus intenses et dans le récepteur les actions magnétiques dues à ces courants se trouvent aussi augmentées.

Autres récepteurs. — Le récepteur *à pôles concentriques* (d'Arsonval) comporte aussi un aimant annulaire, mais l'un des pôles seulement possède un noyau et une bobine ; l'autre pôle est muni d'une enveloppe de fer qui entoure le fil.

Dans le type *Gower*, l'aimant est demi-circulaire avec deux parties radiales dont les extrémités sont garnies de noyaux sur lesquels on a monté les bobines.

Au lieu d'employer un seul récepteur, on fait souvent usage de deux appareils semblables et de petites dimensions que l'on fixe contre les deux oreilles. Quelques-uns, bitéléphone Mercadier par exemple, sont maintenus par un ressort spécial contre les deux oreilles.

CHAPITRE II

TRANSMETTEURS TÉLÉPHONIQUES AVEC PILE

Principe. — Les appareils précédents réalisent un transport d'énergie à distance dans lequel la source de travail est l'ébranlement moléculaire du corps vibrant. Il en résulte que le son diminue d'intensité en se propageant ainsi.

Dans les téléphones à pile, les vibrations ne sont plus utilisées *à produire* des courants, mais elles servent *à distribuer* d'une façon convenable le courant électrique provenant d'une source constante.

Aussi le son rendu peut-il être plus intense que le son émis.

Tous les transmetteurs à pile sont basés sur le principe suivant énoncé dès 1854 par du Moncel :

La résistance électrique présentée par un contact imparfait, obtenu au moyen de deux conducteurs appuyés l'un contre l'autre, est très variable; elle dépend essentiellement de la pression que l'on exerce entre les deux parties.

Ce fait avait été appliqué en 1865 par Reiss, à Francfort, qui était parvenu à communiquer des mots à distance; mais Edison, a construit, en 1876, le premier téléphone à pile, l'année même de l'invention de Bell; nous décrirons plus loin cet instrument. L'année suivante, M. Hughes, qui déjà avait eu occasion d'employer le dispositif de Reiss, construisit son *microphone* et en montra l'application à la téléphonie. Nous commencerons notre étude par l'examen du microphone de M. Hughes.

Microphone Hughes. — Dans sa forme primitive, il consiste en un crayon en charbon aggloméré très dur taillé en pointe et tenu entre deux godets de même substance fixés à une paroi verticale résonnante (fig. 685).

Le socle est également formé d'une boîte creuse D isolée du sol ou de la table par des pieds amortisseurs en caoutchouc ; les deux blocs de charbon C sont les points d'attache de fils qui forment un circuit avec une pile et un récepteur du genre magnétique. Supposons un ébranlement quelconque communiqué à la baguette; il en ré-

sulte une série de variations dans la pression exercée sur les supports et, par suite, aussi dans la résistance du circuit ; le courant est donc ondulé et le récepteur parle. Les moindres vibrations sont ainsi rendues sensibles, ce qui justifie le nom de *microphone* ; on peut entendre à des distances de plusieurs kilomètres le pas d'un insecte, le tic-tac d'une montre et aussi les paroles prononcées près de l'appareil. On a alors un véritable *transmetteur*. Mais le système n'est pas réversible et il faut adopter, pour la réception, un téléphone magnétique.

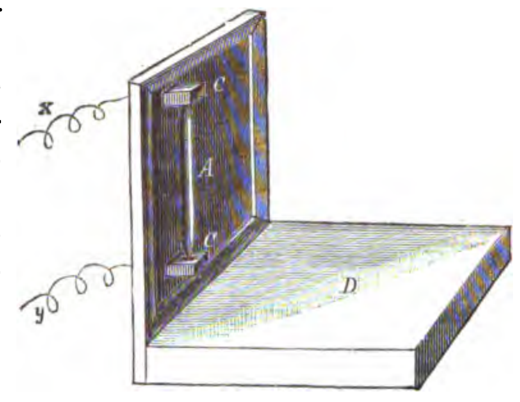


Fig. 685

On compte généralement sur une résistance moyenne de 5 ohms par contact ; la différence de potentiel à employer n'excède pas 1 volt généralement.

On a intérêt, au point de vue de la facilité des transmissions, à augmenter le nombre des contacts. Seulement il faut veiller à ce que tous soient suffisamment voisins afin de produire partout des effets concordants ; c'est ce qui limite ce nombre.

Transmetteur Ader. — C'est une simple modification du microphone Hughes dans laquelle on réunit plusieurs contacts. Sous sa forme la plus ordinaire, il comprend dix crayons de charbon A disposés en deux séries de cinq et s'engageant, par leurs extrémités, dans des trous correspondants pratiqués dans les traverses B C D en charbon fixées sous une planchette de sapin (fig. 686 et 687). Les tiges B et D sont reliées au circuit comprenant la pile et le récepteur, et les moindres ébranlements communiqués au système se traduisent par une grande variation de résistance ; l'intensité des sons reçus se trouve donc amplifiée.

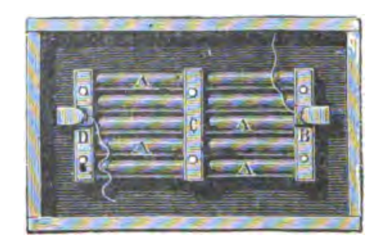


Fig. 686 et 687

Fig. 688.

Téléphone Edison. — Son principe est le même que celui du microphone Hughes ; une pastille de noir de fumée est maintenue entre deux petits disques métalliques reliés au circuit ; la lame antérieure est séparée par un bouton d'ivoire, d'une feuille flexible maintenue sur son pourtour comme dans le téléphone Bell. Au moyen d'un cornet, on dirige les sons sur la plaque vibrante (fig. 688) et on produit

ainsi des pressions variables sur le charbon ; il en résulte des ondulations du courant.

Emploi d'une bobine d'induction. — Quand il s'agit de correspondre à petites distances, on peut envoyer directement au récepteur le courant qui traverse les charbons, comme nous l'avons supposé jusqu'ici. Mais si l'on doit relier deux postes très lointains, le procédé devient inapplicable étant donnée la grande résistance de la ligne. Dans ce cas, en effet, la variation au contact, comparée à la résistance de toute la ligne, est très petite ; admettons, pour fixer les idées, une modification égale à 1 ohm ; si elle a lieu dans un fil de 1.000 ohms, la fraction n'est que de $\frac{1}{1.000}$ et le courant est faiblement ondulé.

Pour obvier à cet inconvénient, dans le cas de lignes longues, on n'envoie pas au récepteur le courant du transmetteur, mais on forme, au poste de départ, un circuit comprenant la pile, le microphone M et une bobine à fil assez gros B (fig. 689). Dans ce conducteur admettons une résistance totale de 10 ohms ; la variation relative devient $\frac{1}{10}$ et le courant se trouve maintenant fortement impressionné par les vibrations ; ce courant sert de primaire à un petit transformateur, ou bobine d'induction, dont le secondaire B′, à fil fin et long, se continue par la ligne et le récepteur R. Les fortes variations du primaire se font sentir dans le secondaire et le récepteur parle vigoureusement.

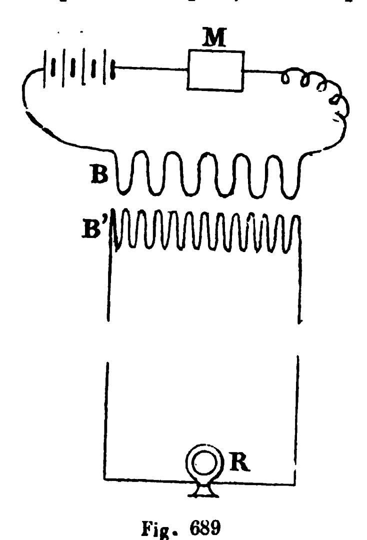


Fig. 689

Dans le système adopté par la Société générale des Téléphones à Paris, le fil inducteur (0,5 mm. de diamètre) n'a qu'une résistance de 1,5 ohm, tandis que le fil induit (0,14 mm.) est cent fois plus résistant. Trois éléments Leclanché à deux plaques agglomérées alimentent le transmetteur.

Autres genres de transmetteurs à pile. — Le type Ader que nous venons d'examiner a été modifié de diverses manières mais tout en conservant les *baguettes de charbon* ; nous ne décrirons pas d'autre modèle de ce genre.

On a remplacé, dans un certain nombre d'appareils, les baguettes de charbon soit par de la grenaille moulée, soit par du charbon granulé. Cette substitution a amené la création de nouveaux genres de transmetteurs : à *grenaille moulée* et à *charbon granulé*. Comme type des premiers nous décrirons le modèle *Berthon* ; comme exemple des seconds, on examinera le *transmetteur Mildé*.

Transmetteur Berthon. — Ce microphone est constitué par un boîtier en ébonite sur le fond duquel est posée, avec interposition d'une rondelle de caoutchouc, une

première lame de charbon munie d'une saillie circulaire qui forme une sorte de cuvette. Une seconde lame de charbon est séparée de la première par une seconde bague de caoutchouc et l'on a placé dans l'intervalle, maintenue par le rebord, de la grenaille de charbon. Un anneau de cuivre vissé dans le boitier maintient le serrage avec nouvelle interposition de caoutchouc. C'est devant la plaque supérieure que l'on parle. Le courant électrique aboutit aux deux lames de charbon.

La grenaille, libre dans sa cuvette, joue alors le rôle des baguettes dans les modèles précédents.

Le téléphone Edison que nous avons indiqué entre d'ailleurs dans la même classe.

Transmetteur Mildé. — Le microphone est constitué par une boite métallique plate dont chacune des faces laisse passer un petit cylindre de charbon. Entre ces deux conducteurs on dispose des granules de coke et l'on place cet ensemble, qui entre dans le circuit d'une pile, derrière la planchette de sapin de l'appareil.

Ces appareils à charbon granulé sont aujourd'hui en grande faveur et on tend à les substituer, dans bien des cas, aux transmetteurs à baguettes de charbon.

CHAPITRE III

LIGNES ET POSTES TÉLÉPHONIQUES

Influences perturbatrices. — 1° *Self-induction* – Les courants transmis sur les lignes téléphoniques sont essentiellement variables, ondulés seulement ou alternatifs, suivant le genre de transmetteur employé. Il résulte de cette nature du courant une influence notable de la self-induction ; il y a retard dans la phase et diminution de l'intensité. Si ce retard était constant, l'effet résultant serait nul, mais on sait qu'il n'en est rien : plus la fréquence est considérable plus le retard de phase prend une grande valeur ; or l'émission se compose d'une superposition de courants plus ou moins brefs suivant la hauteur des sons transmis (son fondamental et harmoniques). Le retard de phase déplace ces courants les uns par rapport aux autres de sorte que le son peut devenir méconnaissable ; dans tous les cas il est altéré.

Quant à la diminution d'intensité des courants, c'est un phénomène moins nuisible : il ne fait qu'affaiblir la parole.

Si l'on veut diminuer la self-induction, il y a plusieurs choses à faire :

a) remplacer le fer sur les lignes par un métal non magnétique, un bronze par exemple ;

b) réduire au strict minimum les électro-aimants en relation avec les lignes ;

c) disposer aux postes des condensateurs dont la capacité s'oppose à la self-induction de la ligne.

2° *Induction mutuelle.* — Elle est due principalement à deux causes :

a) Le fil téléphonique est placé dans le champ magnétique terrestre, il est plus ou moins ballotté par le vent et, coupant les lignes de force, devient le siège de courants d'induction ;

b) Supposons dans le voisinage un fil à lumière ou à transport d'énergie, surtout à courants alternatifs, ou encore un fil télégraphique ou téléphonique. Il agit par induction sur le conducteur qui nous occupe de sorte que toute variation dans l'inducteur se traduit par un courant dans le fil téléphonique ; le récepteur parle et on peut

même saisir souvent les conversations échangées si le fil voisin est un conducteur de téléphone.

Le remède le plus efficace à l'induction consiste à fermer le circuit par un second fil au lieu d'employer la terre. Pour éviter ces phénomènes, on doit également proscrire le fer dans la construction des lignes.

3° La *capacité* de la ligne est très nuisible. Nous avons vu (page 659) son effet sur la propagation des signaux télégraphiques ; il faut, pour la transmission, dépenser un temps considérable sous peine de voir les communications manquer de netteté. Or en téléphonie les conditions ne sont pas du tout les mêmes car la rapidité des mouvements du transmetteur est réglée par la parole et il est difficile d'éviter les effets de la capacité. Au delà d'une certaine valeur de cette grandeur, on ne peut employer le téléphone. Voici d'ailleurs les limites extrêmes fixées par M. Preece.

Soient R la résistance totale de la ligne en ohms.
C sa capacité en microfarads.

Faisons le produit R C. Les plus grandes valeurs admissibles de ce produit sont :
Pour un fil de cuivre aérien : 15.000 ohms-microfarads.
Pour un fil de fer aérien : 10.000.
De plus grandes valeurs rendent les conversations inintelligibles.

4° Il y a des *perturbations accidentelles*, comme les communications d'un fil à un autre, la mauvaise disposition des joints (ce qui forme des sortes de microphones), etc.

Disposition des lignes. — Les lignes sont autant que possible aériennes ; on les a faites en fer et en acier galvanisé ou encore en bronzes divers : phosphoreux, silicieux. On prend souvent le bronze phophoreux dont la conductibilité est suffisante et qui a une grande ténacité. Nous avons vu ses avantages sur les métaux magnétiques au point de vue de l'induction. Ce fil permet en outre d'adopter des portées considérables d'où un avantage économique. Le diamètre généralement admis est de 11/10 millimètre. Le conducteur est soutenu par des doubles cloches en porcelaine fixées dans les villes à des herses de fer, sur les toits des maisons, ou à des potelets sur les murs. Dans les campagnes le fil est porté par des poteaux de bois.

Autant que possible, on fait usage d'un circuit fermé, comprenant deux fils. Pour éviter complètement les effets d'induction, il faudrait tordre ensemble les deux conducteurs. On ne peut le faire puisqu'ils sont nus et l'on doit se contenter de croisements établis aux poteaux supports.

L'établissement des lignes souterraines, dans les villes, présente quelques difficultés ; on emploie toujours un fil de retour. Les conducteurs sont en cuivre ; ils ont un diamètre de 0,7 à 0,9 millimètre et les deux fils d'aller et de retour isolés sont tordus ensemble de manière à ce qu'ils soient tous deux exactement dans les mêmes condi-



tions. On réunit en câble un paquet comprenant de 25 à 100 conducteurs doubles et ces câbles sont placés en égout ou en conduite spéciale enterrée.

L'isolant, que l'on doit employer, demande à être choisi judicieusement ; il faut en effet qu'il ait une faible capacité spécifique. Ce choix est encore de la plus grande importance dans le cas des câbles sous-marins comme celui de Calais-Douvres qui est intercalé sur la ligne Paris-Londres.

Dans certains cas, on affecte une même ligne aux correspondances télégraphiques et téléphoniques ; il faut alors user d'artifices spéciaux.

Postes téléphoniques.— Il faut, pour constituer un poste ordinaire du système Ader, un transmetteur, deux récepteurs, un pour chaque oreille, une source d'électricité, une sonnerie et sa source spéciale.

Voici quel est l'ensemble des opérations à effectuer pour la transmission téléphonique : la sonnerie doit être disposée de manière à fonctionner à l'appel de la station correspondante. Le son perçu, on adapte les récepteurs aux oreilles et ce fait doit établir le circuit de conversation en retirant les sonneries de la ligne.

La figure 690 est le schéma d'un poste Ader ; C représente un commutateur formé

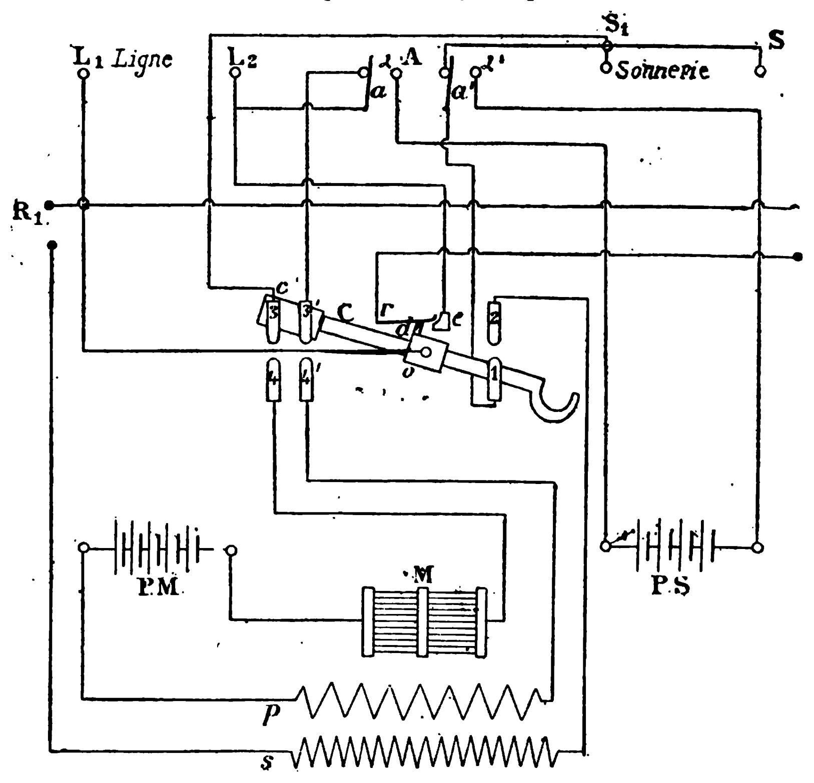


Fig. 690.

d'un levier portant par l'un de ses bras sur l'un des contacts 1 ou 2, d'une part, et, de l'autre, par une pièce c' isolée, sur 3 et 3′ ou sur 4 et 4′ ; sous l'action de son poids seul, le levier prend contact avec 2 et avec 4, 4′, mais si l'on suspend au crochet un

récepteur téléphonique, on amène l'instrument à la position de repos, celle de la figure ; remarquons de suite que le corps du levier, qui touche 1 ou 2 est relié par *o* à la ligne.

En A se voit la *clé d'appel*, interrupteur double, formée de deux ressorts *a* et *a'* qui sont connectés l'un à l'une des bornes de la ligne, l'autre à la pièce 1 ; dans leur position d'arrêt ces leviers reposent sur deux butoirs communiquant respectivement avec 3' et avec une extrémité de la sonnerie.

Examinons successivement comment on peut :

1° Faire un appel à un poste correspondant ;

2° Recevoir l'appel ;

3° Etablir le circuit de conversation.

La position du levier C figurée convient aux deux premières opérations :

1° Si on appuie sur la clef A, on établit les communications respectives de *a* et *a'* avec α et α' qui sont reliés à PS (pile sonnerie) ; on voit alors que le courant de cette pile est envoyé dans la ligne par le trajet α, *a*, L_2 ; il revient par L_1 *o*, 1, *a'*, α'. Il nous reste à voir comment la sonnerie du second poste (qui est dans la disposition de la figure) pourra fonctionner.

2° Le courant venant du poste correspondant entre par L_1, *o*, 1, *a'*, S_2, sonnerie, S_1, 3, *c'*, 3', *a* et retourne par L_2. L'appel est donc entendu.

Le poste appelé répond par une sonnerie semblable.

Quand les deux correspondants sont ainsi en relation, chacun décroche ses récepteurs; cette opération a pour effet de relever l'extrémité du levier; de cette manière voici ce qui arrive :

Le point *o* est mis en communication avec 2 ;

Le circuit sonnerie est coupé entre 3 et 3' ;

Le circuit local, microphoneet primaire *p* de la bobine d'induction, est fermé par *c*, reliant 4 et 4' ;

La pièce isolante *d* laisse tomber le ressort *r* sur le contact *e* relié à L_2.

Dans ces conditions, on voit que le circuit de la ligne est fermé, dans chacun des postes, par L_1, *o*, 2, *s*, récepteur R_1, R_2, *r*, *e*, L_2.

Cette ligne est coupée, en *r-e*, quand on remet le récepteur en place et en même temps, est interrompu en 4-4' le circuit primaire.

La figure 691 représente l'ensemble du poste Ader ; il a la forme d'un pupitre et possède son microphone et sa bobine sous la tablette. Les deux récepteurs s'accrochent de part et d'autre (un seul crochet est mobile). Les diverses attaches sont disposées comme nous l'avons montré dans la figure schématique.

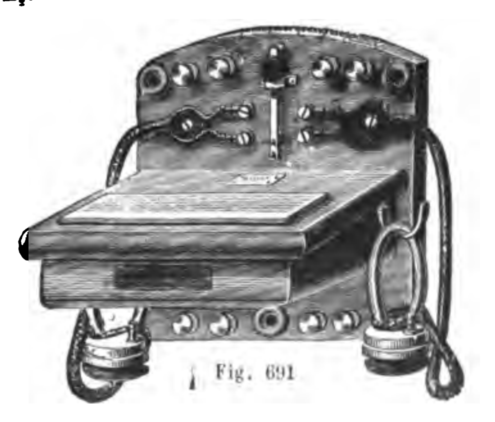


Fig. 691

On voit (fig. 692) un petit poste téléphonique dit *à colonne* ; son récepteur est unique et son microphone est fixé sur un disque métallique.

On a représenté (fig. 693) un type spécial de poste créé par M. Gaillard sous le nom de téléphone *haut parleur*. Il comprend un récepteur avec pavillon E *(écouteur)* et un *transmetteur microphonique* M (parleur). L'énergie électrique est prise à une petite batterie d'accumulateurs ou à une pile capable de donner un grand débit.

Fig. 692.

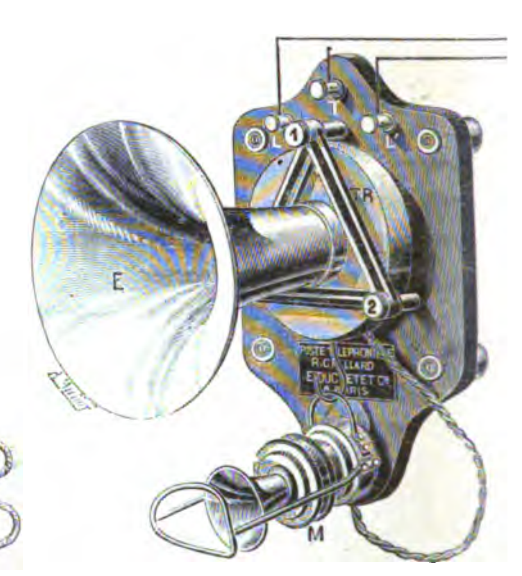


Fig. 693.

Pour parler, on décroche le système M qui comprend le microphone lui-même ; le son rendu est plus intense mais plus grave que le son émis devant l'embouchure.

Les postes comprennent en outre un certain nombre d'appareils dits *accessoires*, tels que *relais de sonnerie*, *parafoudres*, *appareils de mise à la terre*, etc.

Les relais de sonnerie sont nécessaires quand la ligne a une longueur considérable ; nous avons vu en effet que la sonnerie d'une station fonctionne au moyen du courant émis à l'autre poste. En raison de la grande longueur du conducteur traversé, le courant peut être très affaibli et, dans ce cas, on l'utilise pour faire mouvoir un relais dont le rôle est de fermer sur la sonnerie le circuit d'une pile *locale*.

Les *parafoudres* ont pour effet de préserver les employés et les appareils d'un poste, non seulement des décharges atmosphériques mais encore de celles qui peuvent être dues à des communications accidentelles de la ligne et de conducteurs de lumière,

de tramways, de transport de force. La forme des parafoudres est extrêmement variée : très souvent ils sont constitués par une sorte de peigne en cuivre relié à la ligne ; devant ses dents se disposent les parties semblables d'un second peigne relié à la terre. Dès que la tension est assez grande sur la ligne, les pointes donnent à l'électricité un écoulement vers le sol. Un *fil fusible* disposé en outre coupe automatiquement toute communication dès que l'intensité de cette décharge dépasse une limite voulue.

Le parafoudre à charbon adopté par l'Administration française des Postes et Télégraphes est surtout destiné à parer les effets de conducteurs extérieurs mis accidentellement en contact avec les fils téléphoniques : il est formé essentiellement par deux demi-lames de charbon séparées et isolées que l'on met en communication avec les deux fils de la ligne et avec les appareils à protéger. Une feuille mince et perforée de mica sépare ces deux charbons d'une autre lame de charbon réunie à la terre. La communication automatique à la terre est ainsi établie dès que la tension atteint une valeur dangereuse.

Les appareils de *mise simultanée à la terre* de toutes les lignes sont également très variés ; l'un des plus simples consiste en une série de plots, réunis chacun à l'un des appareils, et une série de ressorts correspondants, reliés aux lignes. En temps normal, chaque ressort repose sur un plot et les communications sont ainsi établies. Si l'on veut mettre toutes les lignes à la terre, il suffit de faire tourner, au moyen d'une poignée, un axe métallique monté excentriquement et communiquant avec le sol : tous les ressorts sont soulevés en même temps et les contacts lignes — appareils sont supprimés et remplacés par la liaison lignes-terre.

Dans certains postes, au lieu de piles de sonnerie, on fait usage de petites magnétos mues à la main (appels magnétiques).

Bureaux centraux. — Les réseaux téléphoniques comprennent un nombre plus ou moins grand de postes tous réunis à un même bureau (central) dans lequel on peut établir les communications de l'un à l'autre.

Toutes les lignes d'abonnés pénètrent dans le bureau central en passant par un *commutateur à fiches* qui permet d'effectuer diverses manœuvres : interruption, permutations, mise à la terre, etc. ; elles se rendent ensuite aux *tableaux*.

Dans les postes de petite importance, on peut faire usage des *commutateurs suisses* dont le principe a été donné (page 674) ; chaque abonné est relié à une barre verticale tandis que les lignes horizontales sont destinées l'une au poste du bureau, une autre à établir la communication avec la terre, d'autres encore à relier deux tableaux semblables entre eux, etc.

Lorsque le nombre de lignes est grand, on fait usage d'autres *tableaux*. Ces appareils sont extrêmement variés et très compliqués ; nous n'en donnerons que le principe. *A priori* nous pouvons distinguer les *tableaux standard* et les *multiples*.

Les tableaux standard suffisent quand le nombre des abonnés n'est pas très consi-



dérable. Les lignes sont partagées entre plusieurs tableaux qui reçoivent chacun cent lignes généralement. On trouve, sur chaque tableau, des *annonciateurs*, des *commutateurs à fiches*, une sonnerie, etc.

Chaque abonné possède son annonciateur dont la disposition est celle que l'on a indiquée (voir page 676); supposons qu'un abonné X sonne le poste central ; son annonciateur fonctionne et démasque son numéro d'ordre. En même temps une sonnerie est mise en fonctionnement par une pile locale de sorte que l'employée, dont l'attention est éveillée par la sonnerie et par le bruit de la chute du volet, prend note du numéro de l'appelant ; elle se met alors en correspondance avec X, par un appel d'abord, puis au moyen d'un poste téléphonique. Cette mise en communication se fait ordinairement au moyen d'un *jack* et d'une fiche spéciale. La figure 694 partie gauche, donne une idée de la disposition des jacks ; une entrée métallique légèrement évasée est en communication avec la ligne et l'un des pôles de l'annonciateur ; dans le fond de l'ouverture, une lame de ressort isolée de la garniture est reliée au second fil de la ligne et touche un contact en connexion avec la seconde borne de l'annonciateur. Pour se mettre en communication avec la ligne, on doit donc faire prise à la fois sur le pourtour du jack et sur le ressort du fond. On y arrive au moyen de la *fiche* représentée à droite et formée d'une tête et d'une tige isolées l'une de l'autre et réunies aux deux fils du cordon souple. Si nous poussons la fiche dans le jack, nous établissons les deux connexions demandées et de plus nous soulevons le ressort intérieur du jack, ce qui a pour résultat de couper la communication avec l'annonciateur.

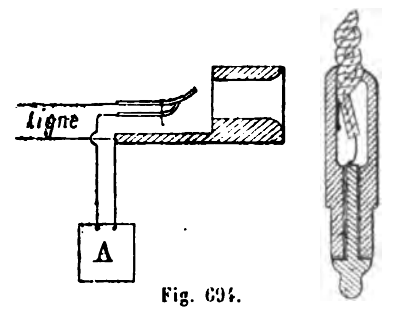


Fig. 694.

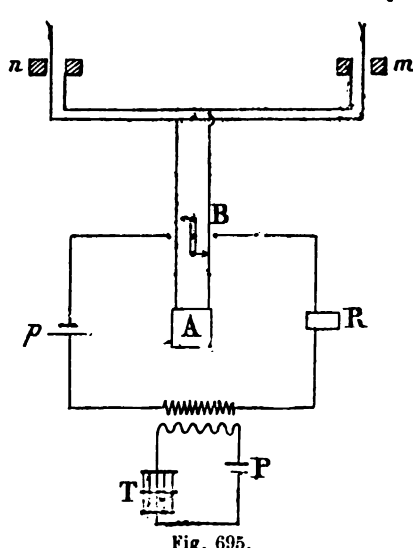


Fig. 695.

On comprend donc comment au moyen d'un poste branché sur le câble souple (fig. 695) la téléphoniste arrive à correspondre avec X. Celui-ci demande Y ; dès lors deux cas peuvent se présenter :

1° Y figure au même tableau que X ;

2° X et Y appartiennent à deux séries différentes.

Dans le premier cas l'employée enfonce simplement la seconde fiche du cordon souple dans le jack de l'appelé et elle se retire du circuit téléphonique.

Si les jacks des deux correspondants ne figurent pas sur le même tableau, on fait usage de jacks spéciaux situés à la partie inférieure des panneaux et qui sont en communication (lignes d'abonnés). La téléphoniste du tableau de X dispose le cordon

souple entre le jack X et une ligne d'abonné ; sa collègue du tableau de Y réunit, par un autre cordon, la même ligne et Y, de sorte que finalement X et Y sont reliés et peuvent correspondre ; un annonciateur A (fig. 695) est laissé sur la ligne tandis que l'appareil téléphonique du bureau central est retiré par le jeu de la clé B. L'annonciateur A, de fin de conversation, fonctionne de la manière suivante : quand les deux abonnés ont terminé leur entretien, ils remettent en place leurs deux récepteurs et sonnent au poste ; le premier de ces appels agit sur A et prévient que les deux lignes peuvent être séparées.

Cette disposition n'est applicable que pour un nombre limité d'abonnés.

Quand le bureau est plus important, on fait usage de *tableaux multiples*. Les abonnés sont encore répartis en tableaux de cent mais chaque panneau présente, outre les *jacks locaux* et les *annonciateurs* indiqués ci-devant, autant de prises (*jacks généraux*) qu'il y a d'abonnés dans tout le réseau. Ainsi par exemple, soit un bureau comportant 5.000 abonnés ; nous aurons 50 tableaux et sur chacun d'eux figureront :

100 jacks locaux et 100 annonciateurs ;
5000 jacks généraux.

Ces derniers sont très petits et tous ceux de même numéro d'ordre dans les divers tableaux communiquent entre eux et avec le *jack individuel local* qui existe dans l'*un* des tableaux. Dans le cas supposé, un même abonné possède donc 51 jacks. (50 *généraux* et un *local*). De cette manière l'installation électrique est beaucoup plus complexe mais le service est bien plus facile à assurer et les fausses communications sont évitées : l'employée en effet a, dans ce cas, simplement à réunir par cordon souple, le jack local X au jack général Y du même tableau. Pour éviter d'interrompre une conversation que l'abonné Y pourrait avoir avec un autre, grâce à des connexions établies sur un autre panneau, la téléphoniste ne pousse pas de suite sa fiche jusqu'au fond du jack général Y ; elle ne fait que toucher légèrement le ressort et écoute, dans son récepteur R, l'effet obtenu : si la ligne Y est en service, le récepteur R fait entendre grâce à la pile spéciale *p*, un bruit particulier ; il faut attendre et en prévenir X. Si le téléphone R est silencieux, la cheville peut être poussée à fond et la communication est établie.

Dans les villes de moyenne importance, un seul bureau central suffit mais les centres plus considérables sont partagés en plusieurs réseaux, ce qui réduit beaucoup les longueurs des lignes. Les divers bureaux centraux communiquent alors entre eux au moyen de *lignes* dites *auxiliaires* et dont le nombre est réglé par l'intensité des relations entre les bureaux.

QUATORZIÈME PARTIE

ELECTROTHERMIE

CHAPITRE PREMIER

CHAUFFAGE DOMESTIQUE

Pour établir une distinction entre les divers moyens employés dans ce chauffage par l'électricité, nous considérerons :

1° Le chauffage par un passage de courant dans une résistance métallique ;

2° Celui qui utilise des résistances non métalliques ;

3° L'emploi de l'arc.

Chauffage par résistances métalliques. — Nous connaissons le principe de cette opération ; il a été exposé page 83, et on peut l'appliquer de diverses façons :

a) En faisant usage de fils nus ;

b) Au moyen de fils noyés dans une matière isolante au point de vue électrique.

a) L'emploi des *conducteurs nus* portés à une température plus ou moins élevée par le courant permet de chauffer *directement* l'air *par convection;* il y a différentes manières d'arriver au résultat. S'il s'agit du chauffage d'une salle, d'un tramway, etc., on peut disposer, dans une boite en métal perforé, un certain nombre d'enroulements en alliage très résistant. Ces spirales, dans le modèle exposé en 1900, par la *Gold car heating C°*, sont montées sur une tige d'acier ondulée et ren-

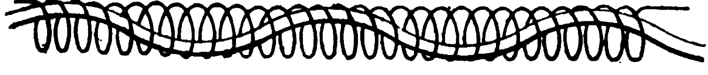


Fig. 696.

due isolante par une couverte d'émail (fig. 696). L'immobilisation est ainsi obtenue tout en réduisant au minimum le contact du fil et de son support.

L'emploi de fils nus est encore possible dans le chauffage des vases de petites dimensions : bouilloire par exemple. Le conducteur est placé dans une double enveloppe et supporté par un revêtement d'amiante.

A cette même classe d'appareils, nous rattacherons ceux qui font usage de bandes excessivement minces de métal déposées sur un support isolant. Le métal adopté doit être absolument inoxydable : or ou argent appliqués au moyen des fondants qui servent dans la décoration des poteries.

b) Les appareils *à fils enrobés* diffèrent en principe des précédents en ce que le chauffage a lieu par l'intermédiaire d'un isolant. Cet isolant doit satisfaire à un certain nombre d'exigences dont voici les principales :

Isolement électrique ;

Conductibilité calorifique ;

Infusibilité aux températures atteintes ;

Dilatabilité calorifique de même grandeur que celle du fil employé.

On comprend aisément la nécessité de ces diverses propriétés. En particulier si la dilatation de l'isolant était très différente de celle du fil, on aurait des ruptures et l'appareil serait rapidement détérioré.

Si nous considérons d'abord les appareils destinés au chauffage des appartements, nous les voyons constitués soit par des *radiateurs*, soit par des *calorifères*. Les radiateurs consistent en plaques métalliques, en fer ou en fonte, munies de nervures nombreuses, pour augmenter la surface de chauffe, et en contact, par leur face opposée, avec l'isolant qui empâte les fils. La figure 697 représente un *radiateur de salon* construit par la société du familistère de Guise. Le fil est en 7 ou 8 dixièmes de millimètre ; il est constitué par du maillechort ou du ferro-nickel, du fer, etc. La température maxima que le fil puisse atteindre est le rouge sombre. On peut d'ailleurs régler le chauffage au moyen de plusieurs circuits. On aperçoit, dans la partie centrale, une lampe à incandescence allumée en même temps que l'appareil fonctionne et destinée à simuler un foyer.

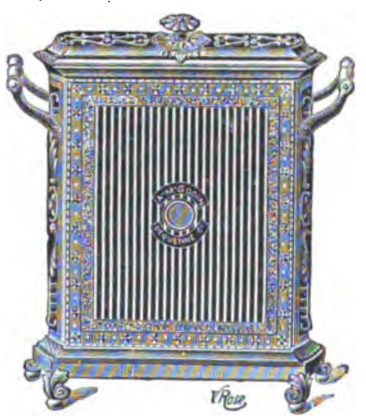


Fig. 697.

Ces plaques peuvent être disposées en appliques ; la face tournée en arrière est alors nue et on ménage un intervalle entre l'appareil et le mur de façon à permettre à l'air de venir se chauffer au contact de l'émail.

La figure 698 montre un *calorifère portatif* de même construction que l'appareil précédent ; il chauffe à la foir par rayonnement et par convection ; des ouvertures pratiquées à

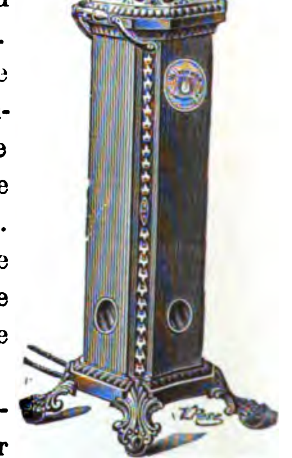


Fig. 698.

la partie inférieure établissent une circulation d'air qui se chauffe et se répand au dehors comme dans les calorifères ordinaires.

Généralement dans ce chauffage électrique, on compte qu'il faut dépenser, par mètre cube d'air à chauffer, une moyenne de 60 à 80 watts, ce qui équivaut à une dépense pouvant varier de 2 à 8 centimes par heure.

Les appareils de cuisine sont disposés d'une manière analogue. On utilise des chauffe-plats, des réchauds, des grils, des cuisinières, etc. La figure 699 montre une cuisinière, du Familistère de Guise, comprenant un réchaud et un four à rôtir. On voit, sur le côté droit, trois interrupteurs : l'un est destiné à commander le réchaud, les deux autres correspondent chacun à la moitié du four. Cette cuisinière, de dimension moyenne, absorbe de 1,5 à 2 kilowatts, soit une dépense variant de $0^{fr},50$ à 2 francs par heure.


Fig. 699.

Le procédé est rapide pour le grillage des viandes : le gril atteint, en 4 ou 5 minutes, sa température normale et alors 3 à 4 minutes suffisent pour cuire un bifteck ; la dépense varie de $\frac{1}{2}$ à 1 kilowatt.

Citons parmi les autres applications du chauffage domestique basées sur le même principe : bouilloires, chaufferettes, fer à repasser, fer à friser, etc. L'emploi spécial des fers à repasser électrique est avantageux, même au point de vue économique, quand il s'agit de fortes installations.

Chauffage par résistances non métalliques. — Nous pouvons distinguer ici le cas où les résistances fonctionnent dans *l'air libre* ou dans le *vide*.


Fig. 700.

a) Les résistances employées à l'air libre peuvent être de diverses natures ; nous citerons d'abord les *résistances métallo-céramiques* (système Parvillée) ; elles repo-

sent sur ce fait que la résistivité d'un métal diminue dans des porportions très notables quand on ajoute à la poudre métallique une matière isolante et quand on agglomère le tout à une très haute température et sous une pression considérable. Ces agglomérés peuvent revêtir les formes de plaques, de lames, de crayons; ils sont montés sur une pièce isolante, en porcelaine généralement, laquelle fait réflecteur. Ces résistances présentent cet avantage de dégager une grande quantité de chaleur sous un petit volume (à cause de la résistivité considérable du mélange); de plus, on peut instantanément les remplacer; enfin toute la chaleur est utilisée étant donnée l'absence de pièces isolantes et le réflecteur qui garnit le fond du fourneau. La figure 700 représente un tel fourneau.

Ce procédé a été appliqué à l'Exposition de 1900, au restaurant *la Feria* du pavillon d'Espagne.

Un autre système que l'on signalera dans cette catégorie consiste à faire usage de plaquettes de silicium aggloméré (Le Roy). Ces lames ont pour longueur 10 centimètres sur un de large avec une épaisseur d'un demi-centimètre mais leur composition est variable de façon à pouvoir modifier à volonté la résistance des plaquettes. Ces lames sont métallisées à leurs extrémités et assemblées en tension sur un cadre de fer; on obtient ainsi des radiateurs de forme rectangulaire qui peuvent aussi être employés comme rhéostats. Quand on veut donner aux résistances Le Roy la disposition de calorifère, on forme des couronnes au moyen de plaquettes montées en quantité et on ménage des ouvertures pour la circulation de l'air.

b) Les résistances dans *le vide* se comportent comme les filaments des lampes à incandescence. Et en effet on peut employer de véritables lampes pour cet usage mais on prend de préférence des lampes spéciales que l'on pousse seulement au rouge naissant de façon à dégager un grand nombre de watts pour un pouvoir éclairant de peu de bougies.

Les *bûches Le Roy* sont basées sur le même principe; elles sont constituées par de petits parallélipipèdes de silicium aggloméré enfermés dans un tube vidé d'air et aboutissant à deux douilles isolées aux extrémités du tube. Le vide permet de pousser les agglomérés jusqu'à l'incandescence sans danger de combustion. Le procédé est pratique pour le chauffage des appartements, mais il l'est moins dans la cuisine, car le verre porté à une haute température est exposé à recevoir des projections liquides capables d'amener sa rupture.

Chauffage par l'arc. — Nous nous contenterons de le citer pour mémoire car le procédé n'est pas encore entré sérieusement dans la pratique.

CHAPITRE II

FOURS ÉLECTROTHERMIQUES

On désigne ainsi des appareils dans lesquels le rôle de l'électricité se borne à la *production de la chaleur* sans exercer d'action chimique sur les produits placés dans le four.

Ces appareils de chauffage peuvent être séparés en deux catégories :

1° Dans les uns, le corps à chauffer n'a aucun contact direct avec les électrodes entre lesquelles on fait jaillir un arc électrique ;

2° Dans les autres c'est le passage d'un courant à travers la matière qui amène l'échauffement.

Le premier moyen est surtout employé quand on désire obtenir, pour certaines réactions spéciales, une température excessivement élevée, celle de l'arc évaluée par M. Violle à 3.500°.

Le second donne un chauffage plus régulier ; la température atteinte dépend de la chute de potentiel entre les deux électrodes. Or cette chute est liée à l'intensité et à la résistance des matières traversées. On conçoit donc la possibilité de faire varier la température entre des limites assez éloignées.

Fours de M. Moissan. — Le premier modèle employé, et qui peut servir à l'étude des réactions à haute température, est constitué par deux briques de chaux vive superposées : l'inférieure est entaillée de deux logements pour les électrodes en charbon et d'une petite cavité destinée à former creuset ; le bloc supérieur est également creusé et il forme la voûte de ce four minuscule. On peut à volonté écarter ou rapprocher l'un de l'autre les deux charbons.

Quand on désire un foyer de plus grandes dimensions, on remplace la chaux vive par de la pierre à bâtir.

Dans tous les cas, la matière à traiter est placée soit directement dans la cavité creusée soit dans un creuset spécial en charbon ou en magnésie.

Ces modèles ont permis à M. Moissan de préparer et d'affiner des métaux difficiles à obtenir dans les fours ordinaires : uranium, chrome, etc., de préparer les carbures métalliques, de produire des cristaux microscopiques de diamant, etc.

Nous allons maintenant examiner quelques préparations obtenues dans des fours électro-chimiques de plus grandes dimensions : carbure de calcium, aluminium, carborundum.

Production du carbure de calcium. — Voici le principe chimique de cette préparation : le charbon à la température du four électrique, réduit la chaux, et le métal formé s'unit à l'excès de carbone suivant la formule

$$CaO + 3C = CaC^2 + CO$$

La *Société des carbures métalliques* de Notre-Dame de Briançon (Savoie) fait usage, pour cette fabrication, de fours à cuve fixe en briques réfractaires entourées de tôles ; le fond du creuset est constitué par du charbon calciné tassé sur les extrémités des câbles en relation avec l'un des pôles de la dynamo. Ce charbon forme donc l'une des électrodes. La seconde est mobile à l'intérieur du four et elle se manœuvre au moyen d'un système mécanique approprié.

Les matières premières employées sont le charbon et la chaux, mais ces substances doivent être aussi pures que possible.

1° Si la chaux contenait des silicates et des phosphates, la réduction donnerait naissance à des siliciures et à des phosphures dont la décomposition ultérieure souillerait l'acétylène préparé au moyen du carbure.

Les usines établies dans la région des Alpes font usage de calcaires extraits sur place et cuits à l'avance.

2° Le charbon doit être pauvre en soufre, en phosphore et en azote pour des raisons semblables ; on adopte quelquefois le charbon de bois mais le plus souvent des anthracites anglais donnant peu de cendres dans la combustion, ou du coke de Saint-Etienne ; ce charbon est concassé.

Les proportions théoriques nécessaires à la production du carbure, et tirées de l'équation chimique écrite précédemment, sont les suivantes

$$CaO\,(56) + 3C\,(36) = CaC^2\,(64) + CO\,(28)$$

Il faut donc théoriquement, pour obtenir une tonne de carbure :

Chaux	875 kilos	1.437,5
Charbon	562,5 —	

Les produits préparés sont alors :

Carbure	1.000 kilos	1.437,5
Oxyde de carbone . .	437,5 —	

Cette énorme production d'oxyde de carbone nécessite une hotte au-dessus de cha-



que fourneau. De plus, il faut assurer une bonne ventilation des ateliers. Généralement aux proportions théoriques calculées, on ajoute un excès de chaux.

La mise en service du four se fait en provoquant d'abord un arc entre les deux électrodes et en ajoutant des quantités successives de mélange (CaO et C) en relevant au fur et à mesure l'électrode mobile, d'après les indications d'un voltmètre branché sur les deux électrodes du four : l'aiguille doit se maintenir à peu près immobile. Le plus souvent on retire le carbure formé par coulées successives ; le produit se solidifie rapidement et on le sépare, s'il y a lieu, des matières étrangères.

Pour éviter l'excès de température, qui est un écueil dans cette fabrication, et aussi la combustion des électrodes au contact de l'air ambiant, les charbons ordinaires ont été remplacés (Gin et Leleux) par des *électrodes mixtes* formées de barres en charbon de haute conductibilité séparées par un aggloméré plus résistant.

Il est à remarquer enfin que l'électricité n'est employée ici que comme agent calorifique ; la nature du courant doit donc être sans influence sur le résultat obtenu. Un certain nombre d'installations fonctionnent en utilisant les courants triphasés ; dans ce cas, il faut multiplier les électrodes : si l'on adopte la disposition en triangle, trois charbons suffisent mais on prend encore le montage en étoile et alors il faut en plus des trois conducteurs, un quatrième charbon réuni au point neutre des alternateurs.

Le rendement des fours est variable ; on peut admettre comme chiffre moyen qu'une énergie d'un cheval-vapeur donne environ une tonne de carbure par an (cela dans une exploitation importante).

Le carbure de calcium est employé dans deux cas principaux :

1° Pour la préparation du gaz acétylène ; on décompose alors le carbure par l'eau, dans des appareils appropriés, suivant la réaction :

$$CaC^2 + H^2O = C^2H^2 + CaO$$

Pratiquement un kilogramme de carbure donne ainsi environ 300 litres d'acétylène. On connaît l'usage de ce gaz dans l'éclairage, son pouvoir vaut quinze fois celui du gaz ordinaire ; il peut également être utilisé à la production de la force motrice et à celle du carbone pour encre d'imprimerie.

2° On utilise encore le carbure de calcium, en raison de son pouvoir réducteur considérable, pour fabriquer certains métaux ou alliages en partant des chlorures ou des sulfures correspondants. C'est ainsi qu'on a pu obtenir une foule de produits parmi lesquels nous citerons seulement : le ferro-manganèse, le ferro-chrome, le ferro-tungstène, le ferro-bore, les fontes de manganèse et de chrome, le nickel-molybdène, le nickel-chrome, le cuivre-chrome, etc.

Fabrication de l'aluminium au four électro-thermique. — La méthode *Cowles* a été employée dans certaines usines (Stoke-on-Trent et Etats-Unis). Actuellement elle est délaissée pour les méthodes *électro-chimiques* (voir plus loin). Nous la citerons surtout pour mémoire.



Elle était surtout appliquée à la production des alliages tels que bronze et ferro-aluminium ; dans un creuset quadrangulaire en terre réfractaire et revêtu intérieurement de charbon de bois chaulé, on introduit de l'alumine, du charbon et le métal que l'on veut allier à l'aluminium. Deux groupes d'électrodes permettent de faire passer un courant intense à travers ce mélange; la réduction et la combinaison des métaux s'effectuent alors.

Fabrication du carborundum. Cette substance est un carbure de silicium ou un siliciure de carbone ; elle répond à la formule SiC.

La réaction que l'on utilise est la suivante : on réduit la silice par le charbon :

$$SiO^2 + 3C = SiC + 2C$$

Les quantités théoriques seraient donc

Charbon	3
Silice	5

Pratiquement on fait un mélange ainsi constitué :

Coke pulvérisé	20
Sable.	30
Sel marin	5
Sciure de bois	2

(Cette dernière matière donne de la porosité à la masse et facilite le départ des gaz).

L'opération se fait dans un four de très grandes dimensions établi entre deux murs parallèles en briques réfractaires et traversés par les charbons-électrodes. Les deux autres côtés (les plus longs) sont démolis et refaits après chaque opération car les briques qui les composent se recouvrent d'un enduit conducteur capable de produire une forte dérivation du courant. Ce courant est de 4.000 à 5.000 ampères sous 180 volts dans les usines de *Niagara falls*. Le four est rempli du mélange indiqué mais on ménage, dans la partie qui sépare les électrodes, une sorte d'âme meilleure conductrice, en coke.

Cette partie centrale, sous l'influence du passage de l'électricité, se modifie et on mène l'opération pendant 36 heures environ en maintenant la tension invariable. Après démolition du four, on trouve le carborundum, partie à l'état amorphe, partie cristallisé autour de l'âme centrale.

L'usine du Niagara fournit par an environ 1.000 tonnes de carborundum ; celle de l'Arbine (Savoie) en donne 500.

Cette matière très dure peut remplacer l'émeri et lui est supérieure dans certaines applications; elle peut servir à travailler les métaux très résistants, le verre, le cristal. On en fait des limes, des meules, etc.

CHAPITRE III

TRAVAIL ÉLECTRIQUE DES MÉTAUX

Nous placerons dans ce dernier chapitre relatif à l'électrothermie un certain nombre d'opérations telles que fusion, soudure, rivure, trempe, recuit, etc.

Fusion. — L'arc électrique permet d'atteindre une température évaluée à 3.500°. A ce point de l'échelle aucun métal connu ne reste solide.

Quant à la manière pratique d'opérer, elle dépend de la nature du corps traité.

On peut faire usage de fours analogues à ceux que l'on a indiqués dans la fabrication du carbure de calcium ou bien des fours de M. Moissan. Mais à ces températures très élevées, la chaux et la silice subissent elles-même la fusion et même la volatilisation ; il en résulte quelquefois des réactions secondaires qui peuvent nuire à la pureté du métal.

Soudure électrique. Système E. Thomson. — La soudure autogène de plusieurs métaux peut être obtenue par l'action d'un arc électrique convenablement dirigé vers les pièces à réunir.

Le principe de la méthode E. Thomson consiste à faire passer un courant intense à travers le joint imparfait constitué par les pièces à réunir maintenues en contact. La jonction est rapidement portée au blanc soudant; on arrête alors le passage de l'électricité et les pièces restent unies après refroidissement. Si elles sont en fer, on martèle après l'opération le joint réchauffé afin de rendre au métal son élasticité.

Le procédé donne la préférence aux courants alternatifs qui se prêtent aisément à la transformation. S'il s'agit de petites pièces, le courant peut provenir directement de l'alternateur ; mais pour des objets de grandes dimensions, on fait usage d'un transformateur dont le primaire à fil fin est alimenté par la machine à haute tension ; le secondaire ne comprenant que quelques spires de barres conductrices, on recueille un courant d'ampérage énorme sous un petit nombre de volts.

L'emploi du procédé a permis de souder des pièces de fer et d'acier dont la section

atteignait 150 centimètres carrés. Les opérations sont d'ailleurs facilitées par ce fait que l'on règle aisément l'énergie dépensée au moyen de bobines de self.

Citons, parmi les emplois de la soudure Thomson, la réunion sur place des rails pour tramways électriques. (Opération possible malgré les dilatations, comme l'expérience l'a prouvé.) Une voiture spéciale reliée à la station centrale contient une commutatrice et un transformateur statique. On arrive ainsi à remplacer le courant continu de l'usine par un courant alternatif à voltage faible et à débit très grand, jusqu'à 40.000 ampères. Un trou est creusé autour du joint et, avec deux pattes en U à jambes courtes, que l'on soude électriquement, on réunit les deux rails voisins. Deux minutes suffisent à l'opération. Cette rapidité est du reste la caractéristique des soudures électriques.

Quant à la solidité, elle est supérieure à celle des joints obtenus par les méthodes mécaniques.

Méthode de Benardos. — On se sert d'une forte batterie d'accumulateurs ou quelquefois d'une dynamo régularisée et protégée par des couples secondaires.

Le pôle — est relié à un marbre de fonte bien isolé et l'autre, par câble souple, à un charbon tenu par l'ouvrier, au moyen d'un manche isolant. Les pièces à souder reposant sur le marbre, on provoque un arc entre elles et le charbon : le métal fond et se soude. Remarquons qu'il ne peut s'oxyder en raison de sa situation au pôle — ; au contraire, il se réduit s'il est un peu oxydé d'avance. Divers moyens sont employés pour cette soudure : les pièces sont mises bout à bout ou se recouvrent. On est arrivé par la méthode indiquée à former des tuyaux, des chaudières, etc.

La rivure se fait sans difficulté car l'arc jaillissant perfore les pièces ; le rivet placé dans les trous superposés de deux lames est traité encore par l'arc pour la constitution des têtes. Le demi-rivet se pose en perçant l'une seulement des deux lames ; on arrive à le souder, par le même moyen, à la feuille de métal qui n'a pas été percée et l'on forme la tête du demi-rivet de sorte que les pièces se trouvent solidement assemblées.

Soudure autogène du plomb. — A ces méthodes se rattache le procédé qui est en usage couramment pour la soudure autogène du plomb, notamment dans le montage des plaques ou des batteries d'accumulateurs.

Les pièces à réunir, bien dénudées, sont mises au contact dans les positions respectives qu'elles devront occuper par la suite. Une région quelconque de l'une d'elles est réunie au pôle — de la source électrique capable de fournir une intensité de 100 ampères environ sous une tension de 3 à 5 volts ; le pôle + de la même source est connecté au crayon mince de charbon que l'on tient en main. Le contact défectueux de ce dernier conducteur et du plomb se traduit par une incandescence rapide du crayon et il suffit de promener ce charbon sur le joint pour fondre et souder les deux pièces aussi profondément qu'on le désire.

Pour obtenir ce courant spécial de 100 ampères sous 5 volts, nous faisons usage à l'Ecole d'Angers d'une petite dynamo dite d'électrolyse ; elle est accouplée à un moteur branché sur le circuit d'éclairage et a permis d'effectuer un grand nombre de soudures très solides.

Recuit local des plaques de blindage. — Ces plaques sont trempées et il est, dans certains cas, presque impossible de les entailler et de les percer pour le montage ; d'autre part il est difficile de ménager des endroits non durcis juste aux points nécessités par l'assemblage des pièces. La Société américaine *Thomson Electric Welding C°* a imaginé de réchauffer à l'électricité la partie qu'il s'agit d'entailler ou de percer. Deux blocs de cuivre refroidis par une circulation d'eau amènent des courants alternatifs à la région que l'on veut traiter ; ils sont appliqués contre le blindage par une pression convenable et quand la partie est suffisamment réchauffée on diminue graduellement le courant de manière à obtenir un refroidissemeut très lent.

Système électrohydrothermique. — Nous signalerons pour terminer cette rapide nomenclature, un procédé qui est à l'état d'essai depuis quelques années ; il est basé sur le phénomène qui se produit quand on intercale un liquide composé dans le circuit d'une source à haut voltage.

Le liquide est enfermé dans une cuve à revêtement intérieur en plomb. Cette lame métallique de grande surface constitue le pôle +, et le pôle — est formé du corps à chauffer, barre de métal, par exemple, que l'on enfonce dans le liquide au moment voulu. La solution est du carbonate alcalin à 20 % environ. L'électrolyse de la solution a lieu de suite et l'on obtient, autour de la barre, un fort dégagement d'hydrogène. Ce gaz entoure le métal comme d'une gaine très résistante à l'électricité et il en résulte une concentration de chaleur en cet endroit ; le métal est rapidement porté à une vive incandescence. Comme source on peut prendre une batterie de 50 à 100 éléments secondaires ; mais les phénomènes sont d'autant plus marqués que l'on adopte un plus fort voltage. Comme intensité, on compte de 4 à 5 ampères par centimètre carré de surface à chauffer.

Parmi les applications de cette expérience, on peut citer le soudage, le forgeage, la fabrication des boulons et des rivets, la trempe, etc.

Deux pièces d'acier se soudent très bien et la solidité du joint est parfaite ; des chaînes d'acier faites ainsi se rompent toujours en dehors des points de soudure.

Pour obtenir la trempe, il suffit de maintenir quelques instants la pièce dans le bain et quand on juge suffisante la température atteinte, on coupe le circuit ; l'action électrolytique cesse et le métal très fortement chauffé se trouve instantanément en contact avec un liquide froid : l'objet se trempe sans déplacement.

Pour effectuer le *recuit*, on chauffe la pièce par la même méthode, mais on la sort du bain au lieu de la laisser séjourner dans le liquide froid.



Toutes ces opérations peuvent être avantageuses parce que le métal est bien préservé de l'oxydation ; il subit même l'action réductrice de l'hydrogène s'il est un peu altéré. En outre, on peut limiter la zône chauffée et par suite trempée ou recuite ; il suffit pour cela d'entourer la partie qui ne doit pas être modifiée d'une gaine de caoutchouc ou d'une autre substance protectrice.

Cette trempe permet de durcir les *surfaces* d'objets astreints à des frottements répétés : le boudin des rails, les fusées des paliers, etc.

Toutes les opérations, effectués suivant ce procédé, donnent de très beaux résultats. Il reste à voir si au point de vue économique et pratique le moyen peut lutter avec les autres méthodes électriques ou mécaniques.

QUINZIÈME PARTIE

ELECTROCHIMIE

CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS

Nous connaissons les actions qui se produisent quand le courant électrique *traverse* un liquide composé, dissolution ou produit de la fusion d'un solide ; on donne à l'électrode positive le nom d'*anode* tandis que l'autre, l'électrode négative, s'appelle *cathode.*

Force électromotrice nécessaire à la décomposition. — Chaque électrolyte oppose au courant une force contre-électromotrice e de grandeur donnée, dépendant de la nature du produit soumis à la décomposition ; et l'opération n'est possible que si la différence de potentiel disponible dépasse cette force électromotrice opposée. Il est donc de toute importance de calculer cette dernière. Nous avons déjà effectué ce calcul (voir page 94). Il a été trouvé que

$$e = 0{,}0433 \times \text{chaleur de formation}.$$

Cette chaleur de formation s'exprime en calories et elle se rapporte à un poids du composé contenant une quantité de chlore, ou d'un autre corps se comportant électrolytiquement comme le chlore, capable de se combiner à un gramme d'hydrogène.

Prenons deux exemples pour montrer comment il convient d'appliquer ce principe.

1° Soit l'eau ; 1 gramme d'hydrogène en s'unissant à la quantité correspondante d'oxygène, pour former l'eau, dégage 34,5 calories. On a donc

$$e_{H^2O} = 0{,}0433 \times 34{,}5 = 1{,}49 \text{ volt.}$$

2° Le sulfate de cuivre : SO^4Cu contient le radical SO^4 capable de s'unir à 2H. Nous devons donc prendre la chaleur de formation se rapportant à la combinaison qui renferme $\frac{SO^4}{2}$, c'est-à-dire $\frac{SO^4Cu}{2}$, soit 79,75 grammes. La chimie nous donne le chiffre de 27,7 calories; d'où

$$e_{SO^4Cu} = 0,0433 \times 27,7 = 1,20 \text{ volt.}$$

En opérant de même pour un certain nombre de composés usuels qui se rencontrent en électrolyse, on obtient les chiffres suivants :

Sulfate de cuivre	1,20 volt.
— de zinc	2,28 —
Chlorure de sodium sec	4,23 —
— — dissous.	4,18 -
Cyanure double d'argent et de potassium. . .	0,485 —

Ces chiffres ne sont d'ailleurs que des données théoriques. On doit donc disposer d'un voltage plus grand que ces valeurs ; et l'intensité du courant établi est d'autant plus considérable que la différence des deux forces électromotrices est plus grande, comme nous l'avons vu.

Quantité d'électricité nécessaire. — Pour obtenir ce résultat, il faut employer la loi de Faraday (voir page 92).

Nous savons qu'un coulomb libère $\frac{1}{96,3}$ milligramme d'hydrogène ou des quantités équivalentes des autres métaux. Cette loi nous a déjà permis de calculer les poids des corps simples, mis ainsi en liberté par un coulomb. En joignant aux chiffres déjà obtenus ceux relatifs à d'autres métaux, nous formons le tableau :

POIDS DES MÉTAUX LIBÉRÉS PAR UN COULOMB	
Aluminium	0,0948 milligramme.
Argent	1,1180 —
Cuivre (sels cuivreux).	0,6614 —
— (sels cuivriques)	0,3307 —
Etain (sels stanneux)	0,6145 —
— (sels stanniques)	0,3072 —
Fer (sels ferreux)	0,2916 —
— (sels ferriques).	0,1944 —
Magnésium	0,1245 —
Mercure (sels mercureux)	2,0750 —
— (sels mercuriques)	1,0375 —
Nickel.	0,3020 —
Or.	0,6812 —
Plomb	1,0729 —
Potassium	0,4056 —
Sodium	0.2390 —
Zinc	0,3437 —

On conclut de là que pour faire déposer un milligramme de ces divers corps simples il faut employer un nombre de coulombs obtenu en prenant les inverses des chiffres précédents. Ainsi par exemple pour l'aluminium il nous faudra :

$$\frac{1}{0,0948} = 10,548 \text{ coulombs}$$

Pour recueillir un gramme du métal il nous faudra employer $10{,}548 \times 1.000 = 10.548$ coulombs.

On a l'habitude d'exprimer autrement ce résultat :

L'unité de quantité d'électricité adoptée est l'ampère-heure qui correspond, comme nous le savons, à 3.600 coulombs. On a ainsi pour l'aluminium en particulier

$$\frac{10.548}{3.600} = 2,958 \text{ ampères-heure}$$

Le même calcul effectué pour les autres métaux nous fournit le tableau :

QUANTITÉS D'ÉLECTRICITÉ NÉCESSAIRES POUR LIBÉRER UN GRAMME DE :		
	En coulombs	En ampères-heure
Aluminium	10.548	2,958
Argent	894	0,248
Cuivre (sels cuivreux)	1.511	0,419
— (sels cuivriques)	3.022	0,838
Etain (sels stanneux)	1.627	0,451
— (sels stanniques)	3.254	0,902
Fer (sels ferreux)	3.429	0,952
— (sels ferriques)	5.143	1,428
Magnésium	8.032	2,231
Mercure (sels mercureux)	481	0,133
— (sels mercuriques)	963	0,267
Nickel	3.311	0,919
Or	1.467	0,408
Plomb	932	0,261
Potassium	2.465	0,684
Sodium	4.184	1,162
Zinc	2.909	0,808

Energie nécessaire. — Nous connaissons la force électromotrice de polarisation présentée par les électrolytes, et d'autre part la quantité d'électricité employée. Rien n'est plus facile dès lors que de calculer l'énergie nécessaire à la décomposition. Prenons comme exemple le sulfate de cuivre : la différence de potentiel à surmonter est 1,20 volt ; donc chaque coulomb traversant le liquide nous coûte 1,20 joule, et les 3.022 coulombs employés au dépôt d'un gramme absorbent :

$$3.022 \times 1,20 = 3.626 \text{ joules.}$$

Nous avons d'ailleurs une autre manière de présenter le résultat. Le tableau déjà consulté nous dit qu'il faut employer 0,838 ampère-heure si l'on veut avoir 1 gramme de cuivre. Or nous opérons toujours au voltage 1,20 ; un ampère à cette tension exige une puissance de 1,20 watt et l'ampère-heure demande 1,20 watt-heure.

Il faut donc consacrer

$$1,20 \times 0,838 = 1,005 \text{ watt-heure.}$$

pour le dépôt d'un gramme de cuivre pris au sulfate cuivrique.

Du watt-heure nous passons aisément au kilowatt-heure ; il suffit de diviser le nombre précédent par 1.000, soit pour un gramme de cuivre

$$0,001005 \text{ kilowatt-heure}$$

ou encore puisqu'un watt vaut $\frac{1}{736}$ de cheval-vapeur

$$\frac{1,005}{736} = 0,00136 \text{ cheval-heure.}$$

Nous pourrions effectuer les mêmes calculs pour les autres liquides mais nous n'aurions pas les véritables chiffres donnés par la pratique; en réalité il y a des causes de pertes assez nombreuses et parmi elles l'échauffement du liquide et les réactions secondaires.

Densité du courant. — La nature du dépôt obtenu dépend beaucoup de la rapidité de l'opération c'est-à-dire de l'intensité du courant employé. Pour définir l'allure de la décomposition, on considère la *densité du courant;* c'est le rapport de l'intensité en ampères à la surface totale des anodes exprimée en décimètres carrés. Ainsi par exemple, soit une cuve dont les anodes ont une surface de 1 mètre carré, le courant étant de 100 ampères. Nous dirons que la densité a pour valeur

$$\frac{100 \text{ ampères}}{100 \text{ décimètres carrés}} = 1$$

Pour chaque liquide spécial, il faut une densité définie ; et si on la modifie, on change la texture du dépôt. Ainsi par exemple pour le sulfate de cuivre tel qu'on l'emploie en galvanoplastie, on doit limiter la densité aux valeurs 1 et 1,5. Pour une densité inférieure à 1 le dépôt est cristallin ; au contraire si on dépasse la limite supérieure, on obtient une matière d'aspect sablonneux, peu adhérente au support.

Durée du dépôt. — Cette donnée dépend essentiellement de deux facteurs : poids du métal déposé et densité adoptée. Il nous est très facile de calculer cette durée; soit



par exemple à déposer 1 kilogramme de cuivre sur une cathode de 1 mètre carré. Nous prendrons une anode d'égale surface et adopterons pour densité 1,5; le courant a pour intensité 150 ampères. Or, pour déposer 1 gramme de cuivre, il faut 0,838 ampère-heure; pour 1 kilogramme la quantité d'électricité est 1000 fois plus grande ou 838 ampères-heure.

Le quotient de ce nombre par 150 donne la durée du dépôt. On a donc

$$\frac{838}{150} = 5 \text{ heures } 35 \text{ minutes}$$

Mélange de sels dissous. — Dans le cas d'un mélange, les divers sels sont décomposés mais inégalement vite; c'est le plus facile à détruire, celui dont la chaleur de formation est la plus faible, qui subit surtout l'électrolyse; et il y a là une influence exercée par les proportions des produits mélangés. L'eau, qui est l'agent ordinaire de dissolution, n'échappe pas à cette loi générale; elle se décompose quand la tension employée le permet ($1^v,49$) et dégage de l'hydrogène qui est capable de réduire le sel à l'état métallique et pulvérulent. Ce dépôt n'a pas la qualité voulue et il entraîne une consommation inutile d'énergie.

Homogénéité des bains. — L'état des diverses portions du liquide exerce une influence très marquée sur la nature des dépôts.

Si la concentration de certaines couches est trop grande, on voit très souvent des cristaux se déposer sur les électrodes quand ces couches arrivent à leur contact. La partie appauvrie du liquide se comporte différemment : les impuretés s'y trouvent par rapport à la matière principale en plus forte proportion que dans les autres régions et le dépôt se trouve fortement souillé.

L'hétérogénéité des bains a une autre influence nuisible: les deux faces d'une même électrode peuvent se trouver en contact avec des liquides de compositions différentes et alors naissent des couples parasites qui occasionnent des dépôts anormaux.

L'homogénéité des liqueurs est donc une condition essentielle de bon fonctionnement; on l'obtient par l'agitation ou encore en chauffant un peu les cuves.

Emploi d'anodes solubles. — Quand on électrolyse une solution en vue d'un dépôt métallique, on détruit peu à peu le sel et les conditions de l'opération varient. Il est possible de rendre le traitement continu en profitant des réactions secondaires qui accompagnent souvent les opérations fondamentales. Ainsi soit par exemple à produire un dépôt de cuivre au moyen du sulfate dissous; on peut employer comme anode une lame de cuivre et alors le radical SO^4 se portant au pôle +, sur cette lame, transforme le métal en une quantité de sel égale à celle que l'on a décomposée.

L'électrolyse, dans ces conditions, consiste simplement dans le passage du métal d'un pôle à l'autre; mais l'emploi d'une anode soluble présente un autre avantage:



la combinaison du radical et du métal de l'anode est une source d'énergie qui récupère à chaque instant le travail dépensé par la décomposition électrolytique. On peut alors réaliser l'électrolyse au moyen d'une différence de potentiel très faible et le seul travail demandé à l'électricité consiste à échauffer le bain; la somme nécessaire, dans ces conditions, dépend uniquement de la résistance présentée par l'électrolyte c'est-à-dire de la concentration et de la composition des bains.

Section à donner aux conducteurs. — La question a une importance capitale car en électro-chimie, on emploie des courants d'intensité très considérable; la perte d'énergie qui résulte du passage, dans ces conducteurs, d'une grande quantité d'électricité, s'exprime par RI^2; elle est fort grande si R n'a pas une très petite valeur. Prenons un exemple pour montrer l'importance de cette perte : soit un courant de 5.000 ampères dans un conducteur en cuivre de 50 mètres de longueur totale, aller et retour. Admettons provisoirement un diamètre de cinq centimètres; le tableau de la page 73 nous conduit à la résistance

$$R = 0{,}0004 \text{ ohm}$$

On a alors pour la perte de puissance :

$$0{,}0004 \times 5.000^2 = 10.000 \text{ watts}$$

soit près de 14 chevaux-vapeur. La section est donc insuffisante et on a tout intérêt à installer une fois pour toutes un câble de très gros diamètre pour épargner la force motrice pendant toute la durée des opérations.

Disposition des cuves. — Dans beaucoup de traitements électro-chimiques, on opère simultanément dans un certain nombre de cuves; il convient donc de rechercher la disposition la plus avantageuse à adopter. Les résultats indiqués d'une manière générale dans l'étude de la distribution de l'énergie électrique trouvent encore leur application; mais ici l'inconvénient capital de la disposition en quantité prend une importance considérable étant donnée la valeur énorme des intensités de courant adoptées; le système devient peu économique à cause de la perte de puissance éprouvée; souvent on se trouve alors obligé de donner la préférence au montage en série.

Dans quelques cas, c'est à la disposition mixte que l'on s'adresse Supposons que nous ayons des dépôts métalliques à effectuer et que nous adoptions le système des anodes solubles. Théoriquement nous allons démontrer qu'il y a avantage à augmenter le nombre des bains que l'on met en plusieurs séries parallèles. Ainsi soit un seul bain; il reçoit par unité de temps, un dépôt p de métal proportionnel à l'intensité I du courant: au lieu d'un seul bac, mettons-en quatre par séries de deux. La résistance présentée par cette combinaison de cuves égale celle d'un seul bain et l'intensité I du courant principal ne change pas sensiblement car, nous le savons, un électrolyte

dans le cas d'une anode soluble, se comporte à peu près comme un conducteur ordinaire; dans chaque série, nous avons $\frac{I}{2}$ et dans chacune des cuves le poids du dépôt atteint $\frac{p}{2}$; il est $4 \times \frac{p}{2} = 2p$ dans les quatre bacs ensemble. On triplerait théoriquement le rendement si l'on prenait neuf cuves en trois lignes de trois, et ainsi de suite: souvent au lieu de faire des cuves séparées montées en plusieurs séries, on augmente les dimensions et l'on forme un circuit unique.

Diverses opérations électro-chimiques. — L'électro-chimie est une branche de l'électricité qui présente tous les jours de nouvelles applications. Nous les classerons de la façon suivante;

1° Reproduction métallique des objets donnés; c'est la *galvanoplastie*.

2° Dépôts de métal à la surface d'objets divers.

3° Préparation de certains produits chimiques.

4° Préparation et raffinage de quelques métaux usuels par procédés électrolytiques. (Electro-métallurgie par voie humide).

5° Electro-métallurgie par voie sèche.

CHAPITRE II

GALVANOPLASTIE

Il s'agit de reproduire un objet au moyen d'un dépôt métallique obtenu électrolytiquement dans un moule pris sur le modèle.

Fabrication du moule. — C'est la première opération à effectuer. On distingue les moules en deux classes : *métalliques* ou *non métalliques*.

1° Les *moules métalliques* se font ordinairement en métal fusible. On obtient une composition convenable par la formule

Bismuth. .	3
Plomb.	2
Étain .	1

S'il s'agit de prendre l'empreinte d'une médaille, on coule un peu de l'alliage sur un plan et on laisse tomber sur la couche bien fluide l'objet à reproduire. Quand le métal est solidifié, on peut retirer aisément le modèle; la reproduction en est très fidèle.

Un autre moyen consiste à déposer sur l'objet à mouler une certaine couche de métal par les procédés mêmes de la galvanoplastie. Quand l'épaisseur du dépôt est jugée suffisante, on le sépare du support et on peut employer le moule ainsi obtenu :

2° *Moules non métalliques ou plastiques.* — Les matières que l'on utilise sont nombreuses : la stéarine, le plâtre, la gutta-percha, la gélatine, le soufre, etc.

Le modèle est généralement un peu graissé à l'huile, puis on le recouvre du corps plastique. Supposons qu'il s'agisse d'une médaille : on commence par enrouler tout autour une bande de carton, de manière à former une boite étanche dont la médaille soit le fond. Dans cette sorte de récipient on coule la matière amenée à l'état liquide (soufre, gélatine), ou gâchée avec l'eau, (plâtre), etc.

Quand il s'agit de reproduire un objet en ronde bosse, le moulage ne peut être fait en une fois, il faut former le moule de plusieurs parties que l'on assemble ensuite. On emploie d'ailleurs quelquefois des matières élastiques qui sont très commodes pour le démoulage.

Si on veut faire usage de gutta, on commence par ramollir cette substance en la pétrissant à la main dans de l'eau chauffée. Lorsque les bulles d'air contenues dans la matière sont certainement expulsées, la gutta est appliquée sur le modèle ; elle est soumise à l'action d'une presse et on laisse refroidir. On a soin généralement de frotter les objets au savon avant d'appliquer la gutta.

Les moules étant fabriqués, il s'agit de leur faire subir une préparation convenable avant de les passer au bain : s'ils sont en métal, matière conductrice de l'électricité, il faut éviter que le dépôt se produise sur les deux faces ; au contraire, un moule en matière plastique ne recevrait le métal en aucun point, si on ne lui communiquait la propriété de conduire l'électricité en tous les endroits à recouvrir.

Pour empêcher le métal de se déposer à l'envers et sur les bords du moule, on emploie un vernis isolant : une solution de cire à cacheter dans l'alcool donne de bons résultats.

Les moules plastiques sont rendus conducteurs soit au moyen de plombagine étendue à la brosse fine sur une surface exposée au préalable à la vapeur, soit par de la poudre de cuivre obtenue par précipitation. Quelquefois on utilise même des réactions chimiques pour métalliser les surfaces : on peut, par exemple, enduire d'azotate d'argent et exposer ensuite aux émanations sulfureuses ; il se forme un précipité de sulfure d'argent bon conducteur de l'électricité. Enfin on métallise la cire et la gutta dans la masse en y incorporant 10 0/0 de plombagine environ.

Dispositions générales. — Autant qu'on le peut, on fait usage d'anodes solubles. La solution métallique est dans une cuve en bois, en gutta ou en verre. Deux tringles généralement sont disposées au-dessus : l'une reçoit les moules préparés et se relie au pôle — d'une dynamo spéciale ; à l'autre, on attache les anodes métalliques qui doivent plonger dans le bain entre les moules. On relie la dernière tringle au pôle + de la machine.

La distance établie entre les deux électrodes a une importance assez considérable sur la marche de l'opération. En effet, si elle est trop grande, on accroît inutilement la résistance des bains ; au contraire, une trop petite distance peut, dans le cas de moules présentant des reliefs, causer des inégalités dans le dépôt, puisque les divers points de la cathode sont séparés de l'anode par des longueurs très différentes.

Nous avons vu comment on calcule la f. é. m. théorique nécessaire à la décomposition. Dans le cas d'anodes solubles, la différence de potentiel peut être inférieure et le voltage demandé à la machine dépend à peu près uniquement de la résistance présentée à l'électricité par les cuves et de l'intensité du courant employé.

Les dynamos servant spécialement pour les opérations électro-chimiques doivent être de construction particulière ; un fort voltage est inutile, mais, par contre, on leur demande un débit considérable ; ce sont des machines dans lesquelles l'induit est à conducteur gros et court, constitué généralement par des barres de cuivre repliées



sur elles-mêmes ou soudées autour de l'armature. L'excitation se fait en dérivation dans le but d'éviter les renversements de sens du courant.

Dans certains cas spéciaux la galvanoplastie se fait par piles ; on choisit alors des modèles puissants parmi lesquels ceux de Bunsen sont préférés.

Reproductions en cuivre. — Le cuivre est le métal le plus employé.

On prend une dissolution de sulfate de cuivre concentrée, mais non saturée, et on y ajoute un dixième environ en volume d'acide sulfurique ; cette solution doit marquer 25° Baumé. Si elle était trop riche en sel, on provoquerait un dépôt de cristaux sur les anodes.

Les moules ne sont placés dans les cuves qu'au dernier moment et on s'arrange de manière à obtenir d'abord un dépôt très lent ; cela donne de la netteté aux reproductions ; on peut adopter pour commencer une densité voisine de 0,30, et quand l'objet entier est recouvert d'une mince pellicule de cuivre, on donne à l'intensité sa valeur normale. Il est souvent recommandé de ne plonger, pendant ces premiers moments de l'électrolyse, qu'une partie des anodes dans le bain. On les enfonce complètement en même temps que l'on augmente l'intensité du courant.

Quand il s'agit d'objets en relief on n'adopte pas les anodes solubles, mais on fait une sorte de charpente métallique, en plomb généralement, à l'intérieur du moule, en évitant les contacts et, pour réparer la concentration, on place dans la solution une certaine quantité de cristaux de sulfate.

Le courant est comme toujours engendré, dans les installations importantes, par des dynamos à fort débit et, dans les appareils d'amateur, par des piles ou par des accumulateurs.

Dans certains cas on peut faire usage d'un procédé tout particulier : la figure 701 représente deux appareils de petite dimension constitués par des cuves remplies d'une

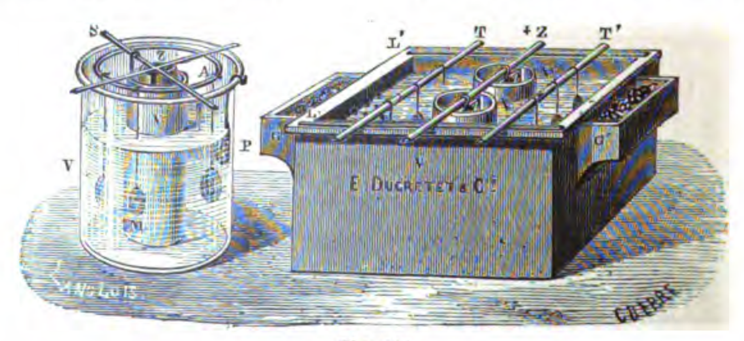


Fig. 701.

solution concentrée de sulfate de cuivre ; dans le bain plongent les moules à cuivrer et des vases poreux contenant de l'eau acidulée et des zincs amalgamés, tous reliés entre eux. On fait, d'autre part, communiquer tous les moules.

Remarquons que cet ensemble représente une pile de Daniell dont les zincs forment le pôle — et les moules le pôle +. Il suffit de fermer cette pile sur elle-même au

moyen d'un conducteur reliant les deux tringles + et — pour provoquer un dépôt de cuivre sur les cathodes. La liqueur s'appauvrit dans cette opération et l'on doit, si l'on veut maintenir la concentration, disposer des cristaux dans le liquide.

Généralement on ne cherche pas à donner au dépôt de cuivre une grande épaisseur : 2 millimètres suffisent très grandement ; mais pour augmenter la solidité de l'objet reproduit, on peut y fondre, au chalumeau ou par l'électricité, des fils de laiton ou encore y couler un métal fusible.

Electrotypie. — C'est un cas particulier de la galvanoplastie. Il s'agit de reproduire en cuivre un cliché en bois ou en zinc. On commence par faire un moule en cire plombaginée puis on le place dans la cuve galvanoplastique et on y dépose une mince couche de cuivre qui est ensuite doublée d'un alliage fusible (plomb-antimoine) ; l'ensemble est monté sur une planchette et l'on peut effectuer les tirages, au moyen de ce *galvano*, comme avec la planche primitive. On a fait également des clichés semblables au moyen du nickel.

CHAPITRE III

DEPOTS METALLIQUES

But. — Il s'agit de recouvrir les divers objets d'une couche de métal. L'opération peut s'effectuer sur des matières non métalliques, en plâtre, par exemple, ou encore sur des métaux que l'on veut recouvrir d'une couche plus décorative ou résistant mieux aux influences atmosphériques. La nature du dépôt est très variable; on s'adresse à l'argent, au cuivre, au nickel, à l'or, etc.

La façon de faire déposer le métal est analogue au procédé galvanoplastique; mais dans chaque cas particulier on doit tenir compte de la nature du support et procéder avec un grand soin au nettoyage des pièces.

Nettoyage des pièces. — L'opération est de nécessité primordiale et la plus légère souillure peut nuire au dépôt; elle l'empêche ou, ce qui n'est guère mieux, détruit l'adhérence et provoque ainsi des *cloques*. Comme matières à combattre il faut citer les oxydes et les substances grasses :

1° Les oxydes sont éliminés par le décapage, traitement à l'eau acidulée, l'acide étant variable d'un métal à l'autre.

2° Quant aux principes gras, on les chasse par une liqueur alcaline, soude ordinairement.

Après ces deux opérations, un lavage soigné est nécessaire et l'on doit surtout éviter le contact des doigts sur les pièces. Ensuite on sèche.

Le décapage peut d'ailleurs s'obtenir électrolytiquement: on met dans un bain acide la matière à nettoyer au pôle positif de la dynamo. Les oxydes se dissolvent par l'action du radical acide qui se porte sur l'anode.

Nous allons examiner rapidement quelques-uns des principaux dépôts.

Cuivrage. — Le dépôt de cuivre se fait très souvent et sur des métaux ou corps variés, soit pour changer l'aspect des pièces, soit pour les rendre moins altérables par l'atmosphère, soit enfin pour permettre de plonger les objets dans les bains de dorure ou d'argenture.

Quand il s'agit de corps tels que le plâtre, que l'on métallise à la plombagine, le

dépôt n'offre aucune difficulté : on prend une solution concentrée de sulfate de cuivre, comme en galvanoplastie, acidulée au dixième et marquant 25° à l'aréomètre Baumé. L'aluminium moyennant quelques précautions se cuivre par ce moyen et pré sente alors la double propriété : légèreté et aspect agréable.

Mais quand il s'agit de recouvrir le fer, la fonte, le zinc, etc., métaux attaquables par les bains acides employés et capables de précipiter le cuivre de ses solutions, on se trouve arrêté par une grande difficulté. On la surmonte de deux manières différentes :

1° On isole au préalable par un vernis le métal support, puis la pièce est métallisée et cuivrée au bain ordinaire.

2° Le bain est modifié. Au lieu de prendre une solution acide, on choisit une liqueur n'exerçant pas d'effet sur les pièces à recouvrir.

Le premier procédé a été appliqué par Oudry, d'Auteuil (1856) ; il consiste à poindre d'abord la pièce au minium puis à l'enduire de vernis à la résine. On sèche et on dépose la plombagine sur ces deux couches. Quelquefois, pour ne pas nuire à la netteté des contours, on met un seul enduit de cuivre très divisé délayé dans l'huile. Le dépôt galvanique se fait par dessus.

Les dépôts effectués par cette méthode présentent le défaut capital de manquer d'adhérence. Il faut réparer constamment les objets au moyen de placages d'enduit au cuivre. En outre les lignes sont toujours plus ou moins altérées.

Le second mode d'opérer n'est pas non plus à l'abri des reproches ; en effet le contact direct du fer et du cuivre donne lieu à un couple électrique capable d'attaquer l'eau et de porter l'oxygène sur le fer si un point de ce métal a été mis à nu.

Les solutions proposées sont nombreuses ; souvent on donne la préférence à un bain de cyanure double de cuivre et de potassium. Le sel est obtenu en faisant agir une solution d'acétate de cuivre sur le cyanure de potassium. On opère très lentement et au moyen d'un bain maintenu tiède sur des pièces aussi bien nettoyées que possible. Après ce premier dépôt, les objets sont examinés attentivement et nettoyés à nouveau aux endroits où le dépôt n'aurait pas pris, puis une deuxième opération identique à la première est pratiquée ; elle est enfin suivie d'un dépôt galvanique définitif au bain de sulfate acidulé.

En général dans cette opération, il est indispensable d'opérer lentement si on veut obtenir une bonne adhérence. Cependant il est possible d'abréger l'opération sans nuire à la solidité : il suffit pour cela de donner au liquide des cuves une agitation suffisante ; on peut ainsi atteindre sans danger une densité de courant de 10 ampères par décimètre carré.

Comme application de ce cuivrage du fer ou de ses carbures, signalons la décoration des fontaines, candélabres, etc., en fonte. On a aussi essayé de cuivrer la carène des navires au moyen de cuves galvaniques déplaçables à volonté sur les parties à recouvrir.



Nickelage. — Le nickel est un métal que l'on dépose sur un grand nombre d'objets : en fer, en cuivre, en zinc, etc. pour leur donner un plus bel aspect et une résistance plus grande aux influences atmosphériques. On a été même jusqu'à nickeler le bois.

Les dépôts ne sont bien durables que si les pièces ont été préparées d'une façon très soignée.

Cette préparation comporte deux séries d'opérations : un *dégraissage* et un *décapage*.

1° Le dégraissage peut se faire dans une solution de potasse d'Amérique au dixième ou au blanc d'Espagne, à l'eau et à la soude.

2° Le décapage du cuivre a lieu dans l'acide azotique au dixième ; celui du fer peut être obtenu par une succession de lavages : à l'acide sulfurique au centième, à l'eau et à l'acide chlorhydrique au cinquième. La mise au bain doit être immédiate pour éviter une nouvelle oxydation.

En général un polissage mécanique est préférable à ce traitement aux acides.

Cette opération préliminaire effectuée, il faut procéder au nickelage ; si l'objet est en cuivre il ne demande aucune nouvelle préparation mais les pièces de fer ou de zinc, avant de passer au bain galvanique de nickel, sont quelquefois recouvertes au préalable d'un dépôt de cuivre (au moyen du cyanure double).

Que l'on ait fait ou non ce dépôt, voici comment le nickelage est obtenu. Les bains employés sont très nombreux ; l'un des plus en usage est préparé au moyen du sulfate double de nickel et d'ammoniaque, d'après la formule :

Sulfate double.	1 kilogramme
Eau de pluie	10 litres

Comme anodes, on prend des feuilles de nickel de grande surface. Ces lames sont faiblement solubles et il résulte de ce défaut une mise en liberté d'acide sulfurique ; or un bain acide donne un mauvais dépôt. Il faut donc ajouter au bain un sel d'ammoniaque à acide organique (citrate par exemple) et de temps en temps, d'après les indications du tournesol, employer du carbonate de nickel pour saturer cet acide mis en liberté dans la cuve.

Généralement on force un peu le courant au début de l'opération dans le but d'isoler aussi rapidement que possible le métal support du bain ; quand l'objet est protégé partout, on ralentit la décomposition en maintenant la tension aux bornes de la cuve à 1 volt environ ; de cette manière l'électrolyse de l'eau et ses conséquences nuisibles se trouvent évitées.

Après l'opération il faut ordinairement un avivage pour donner aux pièces tout leur éclat.

Dans un but d'économie, le nickelage des petites pièces de peu de valeur est fait au *tonneau*. Les objets à nickeler sont introduits dans une cuve tournante, de forme généralement polygonale, et perforée. Cette cuve est immergée dans la cuve électro-

lytique et des contacts convenables placés à l'intérieur sont en communication d'une part avec les objets traités, d'autre part avec le pôle — de la dynamo. Les cathodes de nickel sont extérieures au tonneau.

La rotation continue a pour effet de provoquer un dépôt régulier et de plus elle produit des frottements qui permettent de supprimer l'avivage final : les pièces retirées sont simplement rincées puis séchées.

Dans quelques cas spéciaux, on remplace le nickel par du cobalt, métal moins altérable encore que le premier.

Argenture. — Elle s'applique soit sur cuivre, sur laiton, sur métal blanc. La préparation des pièces comporte un certain nombre d'opérations préliminaires :

1° *Dégraissage* ; il peut se faire de deux manières différentes :

a) pour des objets de grandes dimensions, ne craignant pas l'action du feu (absence de soudures fusibles ou de parties délicates) on chauffe sur un feu doux de poussier de charbon ou de mottes de tan à une température suffisante pour brûler les matières grasses.

b) on opère dans une solution de potasse caustique à 10 0/0 environ et on lave à l'eau.

2° *Dérochage*. — Les pièces, généralement un peu oxydées, sont traitées par l'acide sulfurique au dixième.

Le décapage est ordinairement continué par le passage des pièces dans une série de bains acides, azotique et sulfurique ; un lavage abondant à l'eau doit précéder leur mise dans la cuve galvanique ; le liquide se compose d'un cyanure double d'argent et de potassium que l'on obtient de différentes manières. Voici l'une des recettes :

On prépare le cyanure d'argent par l'action de l'acide cyanhydrique ou prussique sur l'azotate d'argent. D'après le poids d'azotate employé on peut calculer la proportion de cyanure obtenue. On ajoute à ce sel délayé dans l'eau la quantité convenable de cyanure de potassium, suivant les proportions :

Cyanure d'argent. . . . . , . .	250 grammes
— de potassium	500 —
Eau.	10 litres

L'addition au bain d'une petite quantité d'ammoniaque rend le dépôt plus adhérent.

Les anodes sont en argent et leur surface doit égaler celle des objets à recouvrir.

Quant à la densité du courant, il faut la modérer au début et ne pas dépasser ensuite un demi-ampère par décimètre carré.

Quand il s'agit de déposer sur les objets, couverts par exemple, un poids donné d'argent, on fait usage d'appareils spéciaux dont la partie essentielle est une sorte de balance au levier de laquelle on a suspendu les objets. Quand la quantité d'argent voulue est atteinte, le fléau fonctionne et coupe automatiquement le circuit électrique.

Les objets qui sortent du bain sont mats d'ordinaire; on leur donne du brillant au moyen du *gratte-brosse* d'abord puis avec un drap imprégné de rouge d'Angleterre.

Dorure. — Les pièces se préparent comme pour l'argenture ; on les met ensuite dans un bain de cyanure double d'or et de potassium. La composition du liquide est très variable suivant les méthodes.

Considérons seulement l'une des formules :

1° On dissout 100 grammes d'or dans de l'eau régale, suivant le procédé connu, et on fait deux litres de chlorure.

2° On forme huit litres de solution avec 200 grammes de cyanure de potassium.

Les deux liqueurs sont ensuite mélangées et l'on fait bouillir ; le chlorure est transformé ainsi en cyanure qui s'unit à K Cy pour donner le cyanure double voulu.

On a ainsi environ 10 litres de bain qui renferment 100 grammes d'or. C'est une solution relativement concentrée que l'on doit décomposer lentement ; on admet généralement une densité peu supérieure à $\frac{1}{10}$ d'ampère par décimètre carré de cathode. Comme on ne demande qu'une couche mince, quelques minutes d'opération suffisent.

Le mode opératoire varie : on adopte souvent le procédé à chaud (à 60 ou 80°) avec des anodes insolubles, en platine généralement.

Les différentes sortes d'or sont obtenues en modifiant la composition des bains :

Un bain neuf sur argent donne un dépôt *aune*.
— — vieux contenant de l'argent : *vert*.
— — — du cuivre : *rouge* ou *rose*.

Aciérage. — Cette opération a pour but de recouvrir d'une couche de fer les planches de cuivre que l'on a tirées pour l'impression.

On a indiqué plusieurs recettes pour effectuer ce dépôt. L'une d'elles consiste à faire usage d'un bain formé de la manière suivante :

Chlorhydrate d'ammoniaque	100
Sulfate ferreux ammoniacal	200
Eau	1.000

On acidule légèrement ce bain à l'acide sulfurique et on place la plaque de cuivre au pôle —, tandis qu'une anode de fer répare les pertes subies par la solution. L'opération se fait à 60 ou 80°.

La planche ainsi aciérée est bien lavée puis recouverte d'une très légère couche d'un corps gras.

Platinage et palladiage. — Le dépôt de platine peut être effectué sur des objets métalliques ou d'autre composition, mais il est bon souvent d'interposer une

couche de cuivre ; c'est ce que l'on fait toujours quand il s'agit de recouvrir du fer, du zinc, etc. On a également essayé de platiner des électrodes de manière à les rendre inattaquables, mais le dépôt, toujours grenu, est attaqué par le chlore, ce qui enlève au procédé toute sa valeur.

Les recettes proposées pour le platinage sont nombreuses. En général on dissout l'hydrate de platine dans un acide. Par exemple on peut dissoudre à 100° dans un litre d'eau :

50 grammes d'acide phosphorique sirupeux
12 à 15 grammes d'hydrate de platine.

On emploie une anode soit en charbon, soit en platine et on entretient autant que possible la concentration de la cuve par des additions successives d'hydrate.

Le *palladiage* se fait spécialement à la surface des miroirs en cuivre fabriqués par un procédé électrolytique sur un moule de verre. On opère par décomposition d'un bain de chlorure double de palladium et d'ammonium.

Zincage. — Cette opération électrique : *électrozincage* ou *électrogalvanisation* permet de revêtir le fer d'une couche uniforme de métal quelle que soit la forme des pièces. Ce dépôt est actuellement exigé par la Marine française sur les tubes des chaudières à vapeur.

L'opération préliminaire consiste en un décapage très soigné des pièces, soit mécaniquement au *sable*, soit chimiquement à l'*acide étendu* avec lavage ultérieur.

Les cuves à galvanisation sont en bois et reçoivent une solution de sulfate de zinc à 25 0/0 qui doit circuler d'une façon continue. Les anodes sont insolubles, en plomb ; il s'ensuit un appauvrissement du bain avec mise en liberté d'acide sulfurique. Il faut régénérer *partiellement* le liquide (en lui conservant une légère acidité) en le faisant passer sur des rognures de zinc.

Dans le cas particulier des tubes de chaudières demandant un dépôt interne et externe, on dispose à l'extérieur du tuyau une première anode de plomb tandis qu'une seconde pièce semblable placée au centre sert d'anode interne.

CHAPITRE IV

INDUSTRIES ELECTRO-CHIMIQUES DIVERSES

L'électrolyse a été jusqu'ici appliquée à une foule d'industries. Parmi ces applications, les unes en sont encore à la période d'étude ; d'autres sont trop récentes pour avoir reçu une sanction pratique ; nous n'indiquerons ici que celles qui fonctionnent depuis longtemps déjà d'une façon industrielle, en réservant d'ailleurs pour d'autres chapitres les opérations métallurgiques.

Les diverses industries électro-chimiques qui doivent nous occuper actuellement utilisent comme matières premières les chlorures de sodium et de potassium pour les transformer en matières décolorantes et désinfectantes (hypochlorites) ou en chlore et alcalis, carbonates, chlorates, etc.

Nous allons donc examiner très sommairement d'abord la décomposition électrolytique des chlorures alcalins.

Electrolyse des chlorures alcalins. — Soit une solution moyennement concentrée ; soumettons-la à l'action du courant ; nous savons que l'action principale est la suivante :

$$\mathrm{Na}\,Cl = \underset{-}{\mathrm{Na}} + \underset{+}{Cl}$$

Mais il se produit en outre des réactions secondaires : transformation du sodium en soude et production d'hypochlorite.

Cet hypochlorite ne reste pas en nature dans le bain ; il subit lui aussi l'action décomposante de l'électricité et donne ainsi, par réactions chimiques secondaires, un dégagement d'H à la cathode et de l'O à l'anode comme si on avait affaire à un sel quelconque (voir page 89, le cas de SO^4K^2). Les deux éléments obtenus sont respectivement capables d'exercer des effets réducteur et oxydant. On a intérêt à empêcher l'action réductrice et on y arrive par une addition de $\frac{1}{1.000}$ de chromate. Quant à l'oxygène il se traduit :

Partie par un dégagement gazeux à l'anode.

Partie par transformation de l'hypochlorite en chlorate.

Les alcalis ajoutés au bain augmentent la quantité d'oxygène dégagée et diminuent jusqu'à l'annuler la production d'hypochlorite.

La chaleur agit de la même manière sans toutefois empêcher complètement l'existence de l'hypochlorite ; le chlorate se forme alors en plus grande quantité.

Tels sont les faits principaux sur lesquels reposent les procédés que nous avons à examiner.

Production des hypochlorites alcalins. — D'après ce que nous venons de voir, l'hypochlorite est le premier produit obtenu dans l'électrolyse de la solution de chlorure. Il reste formé en quantité maxima si nous évitons les alcalis et la chaleur. Pour empêcher cette dernière influence, on fait usage ordinairement de cuves dans lesquelles on établit une circulation active. La solution préparée ainsi n'est jamais d'ailleurs très concentrée, elle est ordinairement destinée à être consommée sur place soit au blanchiment de la pâte à papier, de la cellulose, des étoffes, etc., soit à la désinfection.

Au lieu d'employer une série de cuves que l'on placerait en tension pour pouvoir utiliser les circuits locaux d'éclairage ou de transport de force, on adopte souvent la disposition des *électrodes bipolaires:* la cuve est unique mais on la partage en un certain nombre de compartiments au moyen du corps destiné à servir d'électrodes, et, dans les compartiments extrêmes (fig. 702) plongent les deux électrodes reliées aux fils de la distribution ; on voit aisément que chaque loge se comporte comme un vase séparé et que chaque lame joue, par ses deux faces, le double rôle de pôle + et de pôle —.

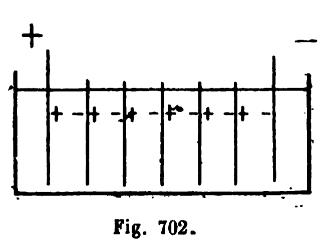


Fig. 702.

Le premier procédé industriel est dû à M. Hermite ; on trouve dans le commerce sous le nom d'*hermitine* un produit antiseptique et désinfectant préparé par cette électrolyse des chlorures.

La méthode est actuellement en usage dans la plupart des papeteries et dans certaines blanchisseries. Citons, parmi les divers procédés, celui de *Kellner* : les cuves sont partagées par des plaques en verre perforé autour desquelles on établit une sorte de bobinage au moyen de fil de platine iridié ; les plaques extrêmes sont également revêtues de platine et l'on établit une circulation rapide en faisant arriver, par la partie inférieure, le liquide qui s'écoule en haut par un trop plein. La solution est du chlorure de sodium à 10 0/0.

Remarquons que, dans ces applications de l'hypochlorite au blanchiment, le même liquide peut servir de nouveau comme électrolyte après son emploi comme décolorant si on a soin de lui rendre la petite quantité de sel qu'il a perdue.

Fabrication des alcalis et du chlore. — A priori, on peut diviser en deux catégories les méthodes destinées à ces préparations : les unes séparent autant que possible les produits obtenus c'est-à-dire le chlore et la soude (si on fait usage de

NaCl) en se servant de *diaphragmes*; les autres n'emploient pas ces cloisons séparatrices.

Parmi les premières, nous citerons seulement le procédé *Hargreaves*: il consiste à électrolyser le chlorure en solution saturée, dans un vase qui est fermé sur ses parois opposées par des *cathodes diaphragmes*. On forme ces plaques de deux parties superposées qui sont, si nous allons de l'intérieur vers l'extérieur, une paroi imperméable au liquide mais laissant passer les produits de l'électrolyse (diaphragme proprement dit) et une toile métallique (fer ou cuivre) en relation avec le pôle — de la source électrique. Ces cathodes-diaphragmes sont recouvertes de pièces de fonte ménageant un espace étroit libre entre le revêtement extérieur et la cathode. On établit, dans la cuve, une circulation de chlorure de sodium qui répare au fur et à mesure du fonctionnement ses pertes de matières premières et dans ces bains plongent des anodes en charbon. Autour de ces électrodes se dégage le chlore; on le recueille au dehors avec la solution de chlorure. Quant au sodium, il est porté vers la cathode à travers le diaphragme, et une injection continue de vapeur d'eau, ou de vapeur et de gaz carbonique, dans l'intervalle étroit dont il a été question, transforme ce métal soit en soude soit en carbonate que l'on recueille.

La partie délicate est le diaphragme; il est constitué par des couches successives qui sont en commençant du côté de la cathode: une feuille de papier, du ciment en petite épaisseur et enfin un mélange d'amiante et de chaux imprégné de silicate de sodium.

Dans les méthodes qui évitent l'emploi d'un diaphragme, on fait usage de mercure destiné à s'unir au métal alcalin formé de façon à supprimer les réactions secondaires. Le principe du procédé est dû à *Castner*; nous l'indiquerons, puis nous verrons les modifications de *Kellner* et de *Solvay*.

Méthode Castner. La cuve électrolytique est divisée en deux compartiments: l'un A (fig. 703) complètement clos avec un tube abducteur pour le chlore, reçoit une anode en charbon *a*, l'autre est libre et loge la cathode *c* en fer. Le fond de la cuve est occupé par du mercure et l'on voit que la cloison *b* sépare d'une façon effective les solutions des deux loges; le mercure intervient alors comme électrode bipolaire: — dans A et + en B. Le *même* courant passant dans ces deux cuves en tension, nous avons respectivement dans chacune d'elles pendant la même période de temps (voir page 91).

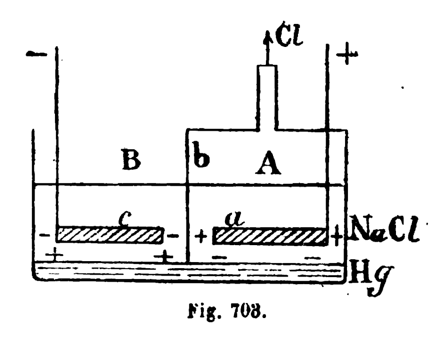


Fig. 703.

$$2\,Na\,Cl = \underset{-}{Na^2} + \underset{+}{Cl^2}$$

et

$$H^2O = \underset{-}{H^2} + \underset{+}{O}$$

Le sodium produit dans la première réaction (sur le mercure) est porté, par une

agitation convenable dans le compartiment B; la quantité d'oxygène O équivalente, à Na^2 produit alors de la soude caustique.

En réalité il y a des pertes parmi lesquelles nous ne retiendrons que la suivante : un peu de *soude* se forme *chimiquement* (par réaction secondaire) en A. Le sodium porté en B n'est donc plus en quantité Na^2 et l'oxygène de l'électrolyse de l'eau est en excès en B ; il oxyde une partie du mercure, d'où :

a) perte de ce métal,

b) formation d'un oxyde résistant à l'électricité et fonctionnement défectueux de la cuve.

Ces inconvénients sont d'autant plus marqués que le sodium reste plus longtemps à l'état d'amalgame.

Modification Kellner. — L'attaque de l'amalgame de sodium par l'eau est assez lente en solution alcaline mais on l'accélère beaucoup en mettant un métal tel que le fer au contact de l'amalgame. Dans ce cas le schéma de la figure 703 doit être un peu modifié : la cathode est constituée par les parois de fer de la cuve et par le mercure qui occupe le fond du vase. Le sodium prend naissance sur cette électrode et l'amalgame, puis un mouvement de bascule imprimé au bain provoque la formation de la soude au contact du fer. On remarque que l'alcali prend naissance par voie *chimique* en produisant une force électromotrice qui s'ajoute à celle que l'on emploie pour effectuer l'électrolyse.

Dans l'application de cette méthode, la maison *Solvay* établit deux circulations inverses de mercure et de saumure ; l'amalgame est alors recueilli et transformé en mercure et en soude dans des appareils indépendants.

Fabrication des chlorates. — Ces sels ont été préparés pour la première fois, d'une façon industrielle, par l'électricité, par MM. Gall et de Montlaur à Vallorbes (Suisse).

L'opération consiste à électrolyser le chlorure de sodium avec addition d'une faible proportion de chromate (pour éviter la réduction). Le chlorate est en effet le seul produit, en quelque sorte, stable, qui provient de l'oxydation de l'hypochlorite. Quand la cuve fonctionne depuis un certain temps la proportion d'hypochlorite formé comme on l'a expliqué précédemment reste à peu près constante et le chlorate se produit presque seul ; sa formation est d'ailleurs accompagnée d'un dégagement d'oxygène, non employé à l'oxydation. Cet oxygène dégagé et celui qui a servi à la production du chlorate proviennent évidemment de l'eau : il en résulte une énorme quantité d'hydrogène libre que l'on n'a pu encore utiliser. Remarquons que les deux gaz se trouvent mélangés d'où la nécessité de précautions spéciales contre les dangers d'explosions.

CHAPITRE V

ELECTRO-METALLURGIE PAR VOIE HUMIDE

L'opération peut avoir pour but la *production* ou simplement le *raffinage* des divers métaux. Nous allons examiner quelques-uns des procédés employés.

Affinage du cuivre. — La *production* du cuivre par voie électrolytique n'a pas donné jusqu'ici de très bons résultats. Il n'en est pas de même de l'*affinage*.

Le métal que fournit la méthode chimique contient un certain nombre d'impuretés dont la teneur peut s'élever de 2 à 5 0/0 quelquefois. Or ces corps étrangers: fer, antimoine, arsenic surtout, etc., ont pour effet de diminuer notablement la conductivité du cuivre. Le métal employé à la confection des conducteurs électriques doit donc être raffiné. Cette industrie se fait sur une très grande échelle aux Etats-Unis surtout; on estime en effet leur production annuelle à 200.000 tonnes; une partie des frais d'opération est d'ailleurs couverte par l'extraction des métaux précieux qui souillaient le cuivre brut, soit en chiffres ronds

5.000 kilogrammes d'or
500.000 — d'argent

par année.

Le procédé consiste à décomposer une solution acide de sulfate de cuivre par le courant en utilisant comme anodes des saumons de cuivre impur; chacun d'eux, dans certains cas, est entouré d'un sac destiné à recevoir les boues provenant de la désagrégation de ces anodes; les cathodes, distantes des anodes de 5 à 10 centimètres, sont des feuilles minces de cuivre pur ou quelquefois des feuilles de papier plombaginées.

Le bain est ordinairement constitué de la manière suivante :

Sulfate de cuivre	20
Eau	80

On y ajoute ensuite :

Acide sulfurique	10

Les réactions principales nous sont connues.

La densité du courant employé a une influence considérable sur le dépôt: si cette densité est grande, le dépot est *rapide* évidemment, mais il est plus ou moins *grenu* et de plus on risque de faire déposer certaines *impuretés* prises au bain et provenant



de la dissolution de l'anode. On doit donc régler cette densité surtout sur la pureté des cuivres traités ; on la fait varier de 0,2 à 1,5 et 2 ampères par décimètre carré. La f. é. m. nécessaire est en moyenne de $0^v,25$ par cuve. On compte ainsi qu'il faut disposer d'une puissance de 10 kilowatts environ pour obtenir une tonne de produit en 24 heures.

Nous pouvons maintenant chercher à nous rendre compte de l'influence des impuretés :

L'or et l'argent se déposent en nature ;

L'antimoine, le bismuth, le plomb forment des composés insolubles ;

L'arsenic passe à l'état d'acide arsénique dans le bain ;

Le fer, le zinc, le nickel se dissolvent également mais à l'état de sulfates.

Ces différents produits amènent donc une altération des bains et l'on est obligé, au bout d'un certain temps de fonctionnement, de purifier le liquide par une opération purement chimique.

La circulation de la solution dans les cuves est généralement employée ; elle présente, entre autres avantages, celui de permettre sans danger une plus grande rapidité d'opération.

Les boues sont soumises à un traitement spécial pour en retirer l'or et l'argent.

Galvanostégie. — Cette nouvelle industrie s'est imposée dans le but suivant : le cuivre obtenu par la méthode précédente a toujours une texture irrégulière, un aspect grenu ; on ne pourrait directement ni le laminer ni l'étirer et il faut une fusion préalable avant ces diverses opérations.

Elmore le premier a réussi à obtenir du cuivre pur à structure fibreuse capable de donner facilement des lames et des fils : pour cela il a fait déposer le métal électrolytiquement sur un mandrin-cathode en acier animé d'un mouvement de rotation ; un brunissoir d'agate est soumis à un va-et-vient continuel le long d'une génératrice de ce cylindre. Le métal, séparé de son support par l'inégalité des dilatations, est très malléalable ; il a la forme d'un tube mais on en fait une feuille en le coupant suivant une génératrice ; les fils sont découpés dans les tubes en suivant un tracé hélicoïdal ; on recuit et on passe ensuite à la filière.

Extraction du nickel. — Ce métal est associé, dans ses minerais, au cuivre et au fer. La matière première contient seulement environ 2 à 3 0/0 de nickel. La première partie de l'opération est purement chimique ; elle consiste à éliminer une grande partie du fer et du soufre et on obtient alors une matte qui contient environ 40 0/0 de chacun des métaux cuivre et nickel. Ce produit est employé comme anode dans un bain obtenu par dissolution de ce même corps dans l'acide sulfurique dilué et additionné d'acide et de sulfate d'ammoniaque : le cuivre se dépose ainsi seul. On arrête l'opération quand le cuivre a presque complètement disparu ; les impuretés sont éliminées chimiquement puis une nouvelle électrolyse fait déposer le nickel ; on se sert pour cela d'anodes en plomb.



Extraction de l'or. — Ce métal précieux est généralement disséminé dans une quantité considérable de gangue siliceuse ; on commence donc par bocarder la masse avec une grande proportion d'eau (10 fois environ le poids du minerai). La boue ainsi formée est envoyée, à travers un tamis, sur une *table d'amalgamation* : plaque de cuivre recouverte de mercure. Ce dernier métal retient une partie de l'or (la moitié en moyenne) et donne un amalgame d'où l'or s'extrait aisément. Mais le reste du métal précieux est laissé dans la pulpe d'où on doit le retirer : pour cela on traite ces boues par le cyanure de potassium qui dissout l'or à l'état de cyanure double. Quand on est en possession de cette solution, il s'agit d'en faire précipiter l'or. Trois moyens se trouvent alors en présence, parmi lesquels vient se classer la méthode électrolytique :

1° Précipitation par le zinc (procédé Mac Arthur) ;
2° — le couple zinc-plomb (méthode Betty) ;
3° Procédé électrique Siemens et Halske.

Ce dernier seul doit bien entendu nous occuper.

La solution étendue de cyanure double est mise en circulation continue dans une série de cuves de bois : elle sort de la partie supérieure de l'une et va à la région inférieure de la suivante. Les anodes sont en fer ; on les entoure de sacs destinés à retenir le bleu de Prusse formé comme produit secondaire ; les cathodes sont constituées par des lames de plomb, sur lesquelles l'or vient se déposer en formant un alliage. L'opération est menée sans interruption avec une très faible densité de courant (0,005 ampère environ) et tous les mois environ les cathodes sont extraites pendant la marche et remplacées par de nouvelles : on obtient ainsi un alliage dont la richesse en or peut varier de 2 à 10 0/0 et davantage. Cette substance est soumise d'abord à la liquation dans le but de l'enrichir en lui enlevant une partie de son plomb ; puis le résidu contenant le métal précieux est enfin coupellé. L'or extrait ainsi titre environ 90 0/0 ; si on le veut chimiquement pur il reste à l'*affiner*.

Dans le but d'éviter l'attaque assez rapide des lames de fer servant d'anodes, action qui souille les bains, on remplace quelquefois (Andréoli) ces électrodes par des lames de plomb peroxydées superficiellement, par le courant, dans un bain de plombate de potassium. Les cathodes peuvent être en fer sur lequel adhère fortement le dépôt d'or ; cette mince pellicule est d'ailleurs enlevée par immersion des cathodes dans un bain de plomb fondu qui s'empare du métal précieux.

Affinage de l'or. — Le principal procédé est celui de Wohlwill ; il consiste à dissoudre l'or à l'état de chlorure et à en faire un bain suivant la formule ;

Chlorure d'or.	20—30 grammes
Chlorure de sodium. . . .	20 »
Acide chlorhydrique. . . .	20—30 centimètres cubes

par litre.

L'opération est poussée rapidement (densité 10 à 20 ampères) à une température de

60 à 70°; l'anode est constituée par des lames d'or brut, tandis que la cathode est une feuille de même métal laminé.

L'argent se dépose dans les boues anodiques et on peut l'en retirer par une opération ultérieure. Quant aux autres impuretés, elles ont pour résultat de faire déposer une certaine quantité d'or du bain et l'on doit de temps en temps réparer la concentration du liquide.

Affinage de l'argent. — Il s'effectue, dans le procédé de Mœbius, par une méthode analogue à celle du cuivre mais on opère ici en solution nitrique. Le bain est du nitrate d'argent auquel on ajoute environ 1 0/00 d'acide.

Les cathodes sont des lames d'argent minces et huilées ; l'argent qui s'y dépose est enlevé continuellement par l'action de brosses mécaniques ; quant aux anodes, ce sont des plaques d'argent brut enfermées dans des sacs de mousseline paraffinée pour empêcher l'action dissolvante de l'acide.

CHAPITRE VI

ÉLECTRO-MÉTALLURGIE PAR VOIE SÈCHE

Avantages des méthodes par voie sèche. — L'électrolyse des produits fondus présente sur les méthodes précédentes un certain nombre d'avantages parmi lesquels il faut citer :

L'absence de réactions secondaires;

Pas d'électrolyse de l'eau ;

Pas de limite ordinairement pour la densité du courant employé.

L'action calorifique se joint à l'influence électrique proprement dite et cette chaleur est tout entière utilisée. Un inconvénient qui a quelquefois son importance est la perte par volatilisation d'une partie des métaux fabriqués.

Les méthodes électro-métallurgiques par voie sèche ont été appliquées à plusieurs métaux. Parmi eux le principal que l'on obtient ainsi est l'aluminium ; c'est le seul que nous examinerons.

Minerais et alliages de l'aluminium. — L'aluminium est un des métaux les plus répandus dans l'écorce terrestre. Les minerais principaux sont au nombre de trois :

Le *corindon*, oxyde d'aluminium Al^2O^3.

La *bauxite*, alumine hydratée Al^2O^3, Aq.

La *cryolithe*, fluorure double d'aluminium et de sodium : Al^2Fl^6, 6 NaFl.

Quant au métal, ce n'est pas ordinairement à l'état pur qu'on cherche à le produire mais on l'emploie à l'état d'alliage avec divers autres métaux. Parmi ces corps nous signalerons ;

Le *ferro-aluminium* contenant fer et aluminium en proportions variables. Cette matière sert à introduire le métal dans les corps qui doivent en contenir, par exemple dans le fer et ses carbures, la fonte et l'acier. L'addition d'une toute petite quantité de ferro-aluminium à la fonte (1 0/0 environ) produit un effet des plus intéressants ; le métal acquiert une fluidité plus grande ; il se moule d'une façon très nette, devient plus résistant au choc. Le fer et l'acier additionnés de la même proportion prennent une plus grande fusibilité et des propriétés précieuses dans la fabrication des pièces magnétiques des machines dynamos.

Les *bronzes d'aluminium* se font en diverses proportions ; avec 10 0/0 d'aluminium on a un alliage d'un beau jaune susceptible d'un poli brillant, résistant aux influences atmosphériques et qui se moule aisément. Si la proportion du métal adjoint au cuivre est supérieure, si elle atteint 30 et 35 0/0 on arrive à un produit dont les propriétés se rapprochent de celles de l'acier. Un peu de silicium change beaucoup les qualités du bronze ; si on met 10 0/0 de ce silicium avec une faible dose d'aluminium, on obtient un alliage très ductile. L'addition de la même dose de silicium avec les proportions ordinaires d'aluminium donne beaucoup de résistance à la traction.

On fait aussi des *laitons* qui sont très élastiques et résistants à la traction. Ces alliages comprennent en moyenne :

Cuivre.	56 à 57
Zinc	40
Aluminium	4 à 3

Enfin l'*argentan d'aluminium*, métal de la couleur de l'argent mais plus léger et plus dur, contient

Aluminium	95
Argent	5

Procédé Héroult. — C'est la méthode la plus employée en Europe ; elle est appliquée notamment à Newhausen et à Froges (Isère) depuis 1886. Son principe réside dans l'électrolyse de l'alumine dissoute dans de la cryolithe. L'alumine que l'on utilise doit être pure c'est-à-dire être exempte surtout de silice car le silicium s'allierait au métal et en modifierait les propriétés ; on emploie donc plutôt la bauxite rouge (colorée ainsi par du fer) que la blanche (qui renferme de la silice). Cette matière première est tout d'abord purifiée par des procédés purement chimiques ; elle est alors propre à passer dans les fours ou *électrolyseurs*.

Les creusets sont formés de tôles d'acier, lours parois sont hasquées. L'alumine placée dans ce creuset est soumise à l'électrolyse en prenant pour cathode le bain lui-même et pour anodes des baguettes de charbon plongeant dans le bain et déplaçables à volonté ; le métal provenant de la décomposition se porte au pôle — ; pour commencer l'opération, on place dans la cuve des quantités convenables de cryolithe et de bauxite et on en provoque la fusion par le courant ; l'électrolyse se produit ensuite aux dépens de l'alumine de sorte qu'il faut alimenter le bain d'oxyde ; mais en même temps on ajoute des petites quantités de dissolvant, c'est-à-dire de cryolithe pour réparer les pertes qui ont pu se produire.

Cette opération demande environ 7 volts entre les deux électrodes ; on peut donc disposer un voltmètre entre les deux électrodes et régler l'addition de l'alumine sur les indications de l'appareil de mesure, le plus souvent on remplace le voltmètre par une lampe à incandescence de 10 volts ; en marche normale le filament, sous la tension de 7 volts, rougit légèrement ; si au contraire le four demande de l'alumine, le voltage s'élève par le fait de l'augmentation de la résistance du bain ; on voit alors la lampe

devenir plus lumineuse, dans le but d'éviter unè trop grande usure des électrodes +, on maintient à la surface du bain une couche de poussier de charbon.

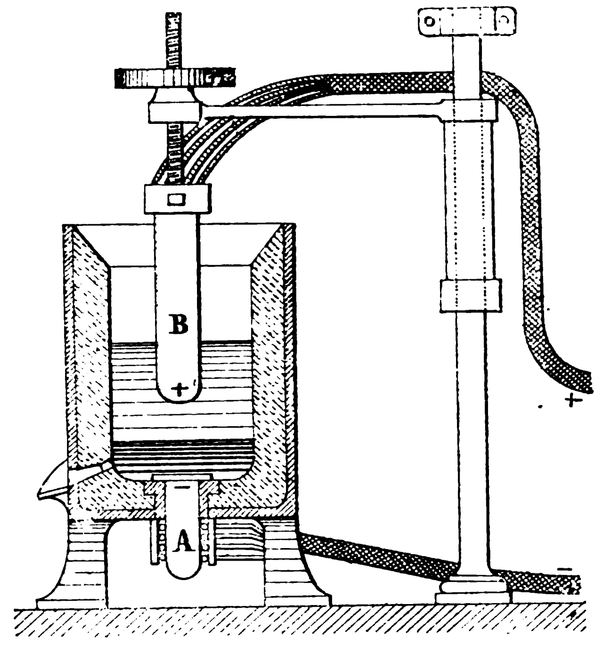


Fig. 704.

Suivant l'importance des cuves, la coulée a lieu toutes les vingt-quatre heures, toutes les douze heures ou plus souvent.

La figure 704 représente schématiquement les creusets employés à la fabrication de l'aluminium métallique; l'électrode + est déplaçable à volonté par le jeu d'un petit volant; la cathode A est constituée par les parois mêmes de la cuve.

Le schéma (fig. 705) se rapporte au cas où l'on veut obtenir spécialement des alliages d'aluminium; les parois sont en tôle et le revêtement se trouve constitué par du charbon; le pôle négatif de la dynamo aboutit aux parois de la cuve tandis que le pôle + est connecté à une série d'électrodes suspendues à une potence; le métal que l'on doit allier à l'aluminium est introduit avec les matières premières.

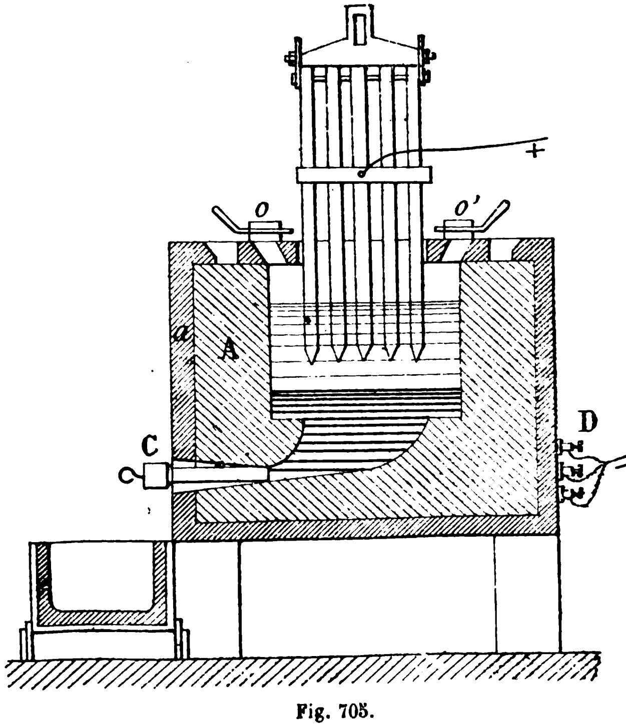


Fig. 705.

Procédé Hall. — Cette méthode est surtout employée en Amérique; deux fabriques de 5.000 chevaux-vapeur chacune l'utilisent aux chutes du Niagara. En principe elle ne diffère de la méthode précédente que par la nature du dissolvant; au fluorure double d'aluminium et de métal alcalin, on ajoute du spath fluor (fluorure de calcium) ce qui augmente la solubilité des bains pour l'alumine.

L'opération se fait dans une série de creusets en fer revêtus intérieurement de charbon ; les récipients eux-mêmes servent de cathodes et on y fait plonger une série de charbons formant les anodes ; cinq volts environ suffisent à cette opération mais suivant la teneur des bains en alumine, la résistance peut varier du simple au quadruple ; une lampe-témoin guide l'ouvrier chargé d'introduire l'alumine. Chaque petite cuve fournit environ 50 kilogrammes de métal par vingt-quatre heures.

Applications de l'aluminium.— Nous ne parlerons pas de ses emplois ; nous indiquerons seulement l'usage qu'on en a fait pour la réduction des oxydes et la fabrication des métaux : chrome, manganèse, etc. A côté de ces applications il convient de signaler le procédé, dit *aluminothermie*, pour le chauffage local très intense ; il repose sur l'énorme quantité de chaleur dégagée dans la réduction des oxydes métalliques par l'aluminium. L'oxyde adopté est celui de fer ; on prend alors un mélange de cet oxyde et d'aluminium : c'est la *thermite* ; on l'allume au moyen d'une cartouche spéciale (de bioxyde de barium et d'aluminium) laquelle est elle-même mise en feu soit par un ruban de magnésium, soit par une simple allumette-tison. La température atteinte dans cette opération est telle qu'on arrive à souder de grosses pièces de fer (rails par exemple), tuyaux, etc. On a aussi utilisé la méthode à la réparation de pièces métalliques telles que dents de pignon ou autres et les soudures obtenues dans tous les cas sont d'une grande solidité.

ERRATA

Page 265 (dernière formule): permuter les coefficients K et k, lire: par conséquent:

$$I = \sqrt{\frac{C}{K}} \sqrt{\alpha} = k \sqrt{\alpha}$$

Page 273 (première formule): remplacer l'exposant — a par — aT; lire:

$$\frac{\alpha_n}{\alpha_{n-1}} = e^{-aT}$$

Page 286 (23e ligne). Remplacer le mot *galvanomètre* par *circuit principal.*
Page 286 (dernière ligne): remplacer cette ligne et les suivantes par ce qui suit:

Le courant i' qui traverse le galvanomètre est donné (voir page 80) par

$$\frac{i'}{i} = \frac{r}{g+r}$$

d'où

$$i' = \frac{\frac{1}{100}}{R + \frac{gr}{g+r}} \times \frac{r}{g+r} = \frac{\frac{1}{100}}{R\,(g+r) + gr} \times r \qquad (4)$$

Nous voulons maintenant que le même courant i' (produisant une déviation d'un millimètre) soit dû à une f.é.m. de n volts; les résistances R′ et r' devront alors être telles que

$$(5) \qquad i' = \frac{n}{R'\,(g+r') + gr'} \times r'$$

Egalons ces deux expressions de i'; nous avons entre R, r, R′, r' la relation

$$(6) \qquad \frac{\frac{1}{100}}{R\,(g+r) + gr} \times r = \frac{n}{R'\,(g+r') + gr'} \times r'$$

Nous pourrons, etc. (page 287, 3e ligne).

Page 330 (titre) production industrielle *du* courant continu.
Page 400 (5e ligne) lire *dérivations* au lieu de *déviations*.

Table des Matières

INTRODUCTION

PREMIÈRE PARTIE. — Électrostatique.

DEUXIÈME PARTIE. — Magnétisme.

CHAPITRE IV

Magnétisme terrestre.

TROISIÈME PARTIE. — Courant électrique.

CHAPITRE PREMIER

Généralités sur la production du courant.

CHAPITRE II

Loi d'Ohm

CHAPITRE III

Puissance d'un courant.

CHAPITRE IV

Courants dérivés

CHAPITRE V

Actions calorifiques du courant électrique.

CHAPITRE VI

Actions chimiques du courant.

CHAPITRE VII

Diverses espèces de piles

CHAPITRE VIII

Piles thermo-électriques

CHAPITRE IX

Groupement des piles.

CHAPITRE X

Accumulateurs électriques.

QUATRIÈME PARTIE. — Électro-magnétisme et électro-dynamique.

CHAPITRE PREMIER

Phénomènes généraux de l'électro-magnétisme.

CHAPITRE II

Loi élémentaire de l'électro-magnétisme.

CHAPITRE III

Phénomènes généraux de l'électro-dynamique.

CHAPITRE IV

Loi élémentaire de l'électro-dynamique.

CHAPITRE V

Etude du champ magnétique.

CHAPITRE VI

Assimilation des courants et des aimants.

CHAPITRE VII

Aimantation par les courants. Electro-aimants.

CINQUIÈME PARTIE. — Courants d'induction.

CHAPITRE PREMIER

Induction dans les conducteurs linéaires.

CHAPITRE II

Lois de l'induction

CHAPITRE III

Coefficients d'induction

CHAPITRE IV

Cas particuliers d'induction.

CHAPITRE V

Bobine de Ruhmkorff.

CHAPITRE VI

Induction dans les masses conductrices.

CHAPITRE VII
Décharge électrique.

SIXIÈME PARTIE. — Mesures électriques.

CHAPITRE PREMIER
Unités employées.

CHAPITRE II
Mesure des intensités.

CHAPITRE III
Mesure des quantités d'électricité

CHAPITRE IV
Mesure des différences de potentiel.

CHAPITRE V
Mesure des résistances.

CHAPITRE VI
Mesure de la capacité électrique

CHAPITRE VII
Mesure de la puissance et de l'énergie électriques.

CHAPITRE VIII
Mesures magnétiques.

SEPTIÈME PARTIE. — Production industrielle du courant continu.

CHAPITRE PREMIER
Préliminaires sur les machines génératrices en général.

CHAPITRE II
Etude sommaire d'une machine à courant continu.



CHAPITRE III

Etude des inducteurs.

CHAPITRE IV

Etude de l'induit et du collecteur.

CHAPITRE V

Etude générale complémentaire de la dynamo.

CHAPITRE VI

Installation, marche et entretien des dynamos.

HUITIÈME PARTIE. — Courants alternatifs, leur production industrielle.

CHAPITRE PREMIER

Généralités sur les courants alternatifs.

CHAPITRE II

Courants polyphasés.

CHAPITRE III

Mesures relatives aux courants alternatifs.

CHAPITRE IV

Etude sommaire d'un alternateur.

CHAPITRE V

Etude des inducteurs.

CHAPITRE VI

Etude de l'induit.

CHAPITRE VII

Etude générale complémentaire des alternateurs.

CHAPITRE VIII

Etude du fonctionnement des alternateurs.

NEUVIÈME PARTIE. — Distribution de l'électricité.

CHAPITRE PREMIER

Préliminaires.

CHAPITRE II

Stations centrales. Groupement des unités.

CHAPITRE III

Distribution par courant continu.

CHAPITRE IV

Distribution par courants monophasés. Transformateurs.

CHAPITRE V

Distribution par courants polyphasés.

CHAPITRE VI

Distributions polymorphiques.

DIXIÈME PARTIE. — Éclairage électrique.

CHAPITRE PREMIER

Arc électrique.

CHAPITRE II

Eclairage par incandescence.

CHAPITRE III

Installation de l'éclairage électrique.



ONZIÈME PARTIE. — Transport de l'énergie par l'électricité.

CHAPITRE PREMIER
Moteurs à courant continu.

CHAPITRE II
Moteurs à courants alternatifs en général.

CHAPITRE III
Moteurs monophasés synchrones.

CHAPITRE IV
Moteurs polyphasés synchrones.

CHAPITRE V
Moteurs asynchrones à champ tournant.

CHAPITRE VI
Moteurs asynchrones monophasés.

CHAPITRE VII
Comparaison des divers moteurs.

CHAPITRE VIII
Transport de l'énergie par l'électricité.

CHAPITRE IX
Distribution de l'énergie par l'électricité. — Applications.

CHAPITRE X
Traction électrique.

DOUZIÈME PARTIE. — Télégraphie électrique.

CHAPITRE PREMIER
Principes de la télégraphie.

CHAPITRE II
Appareils à indications fugitives.

CHAPITRE III
Télégraphes à signaux enregistrés.

CHAPITRE IV
Télégraphes imprimeurs.

CHAPITRE V
Postes et lignes télégraphiques.

CHAPITRE VI

Télégraphie sous-marine.

CHAPITRE VII

Télégraphie sans fil.

TREIZIÈME PARTIE. — Téléphonie.

CHAPITRE PREMIER

Téléphones magnétiques. Récepteurs.

CHAPITRE II

Transmetteurs téléphoniques avec pile.

CHAPITRE III

Lignes et postes téléphoniques.

QUATORZIÈME PARTIE. — Electrothermie.

CHAPITRE PREMIER

Chauffage domestique.

CHAPITRE II

Fours électrothermiques.

CHAPITRE III

Travail électrique des métaux

QUINZIÈME PARTIE. — Électrochimie.

CHAPITRE PREMIER

Généralités.

CHAPITRE II

Galvanoplastie

CHAPITRE III

Dépôts métalliques

CHAPITRE IV

Industries électro-chimiques diverses

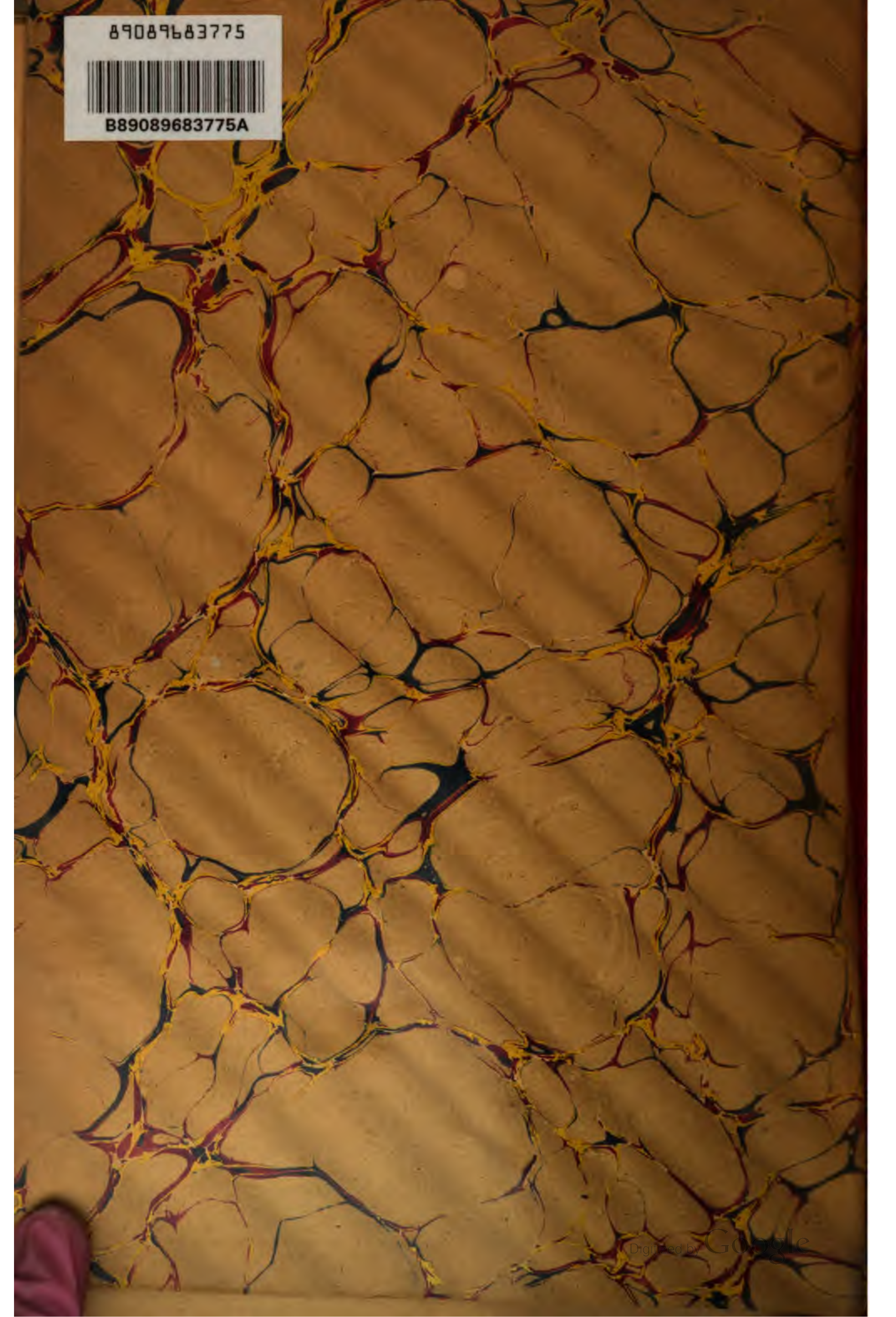
CHAPITRE V

Electro-métallurgie par voie humide

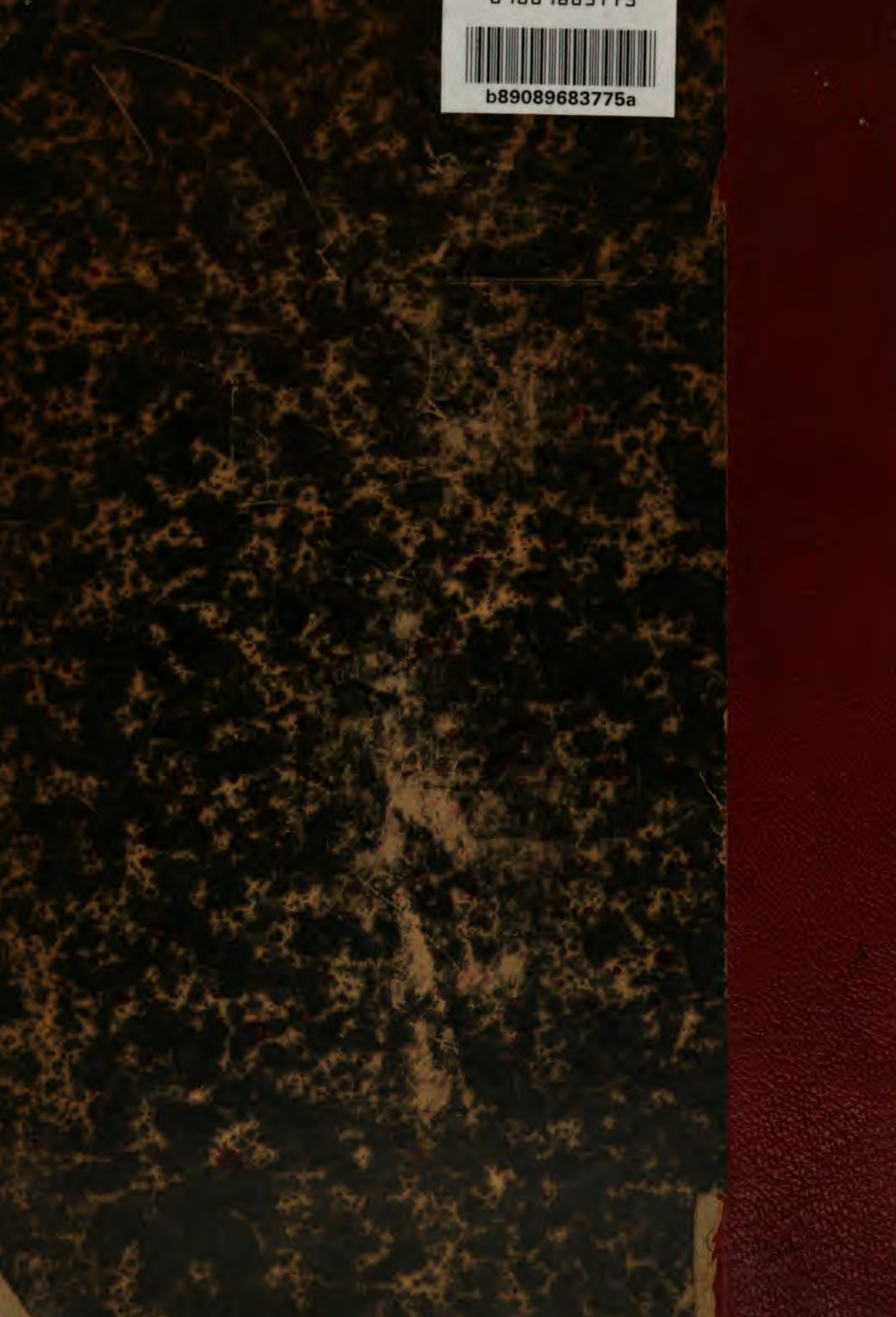
CHAPITRE VI

Electro-métallurgie par voie sèche

Courbevoie. — Imprimerie E. BERNARD et Cie, 14, rue de la Station. Bureaux : 29, Quai des Grands-Augustins, Paris.




STECHERT
EW YORK
Google


b89089683775a